

Hängedächer

Entwicklungsgeschichte, Konstruktionssysteme und Tragverhalten

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer
Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Ilka Jessen
geboren am 18.04.1971
aus Kiel

Eingereicht am	11. Dezember 2012
Disputation am	11. Juli 2013

Berichterstatter	Prof. Burkhardt Prof. Ummenhofer
------------------	-------------------------------------

2013

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Tragwerksplanung der TU Braunschweig.

Ausgangspunkt für die Arbeit ist die Dissertation „Das hängende Dach“ von Frei Otto, in der erstmals umfassende Betrachtungen an leichten Flächentragwerken vorgenommen wurden. In der Auseinandersetzung zum Thema mit Herrn Prof. Burkhardt, der sich selbst viele Jahre als Mitarbeiter bei Prof. Frei Otto am Institut für leichte Flächentragwerke an der Universität Stuttgart auf diesem Gebiet spezialisiert hat, entwickelte sich die Idee der näheren Untersuchung von Hängedächern. Diese besondere Konstruktionsart leichter Dachtragwerke ist bisher meist nur mit Bezug auf spezielle Bauwerke betrachtet worden. Meine Dissertation zielt daher auf eine umfassendere Auseinandersetzung und Untersuchung der Hängedachkonstruktionen.

Für die vielen Anregungen und Gespräche, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die gewährten Freiheiten zur Fertigstellung dieser Arbeit während meiner Zeit am Institut für Tragwerksplanung bedanke ich mich besonders bei Herrn Prof. Burkhardt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ummenhofer bin ich sehr dankbar für das Interesse an der Arbeit und die Anfertigung des Zweitberichts. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Kloft für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Staab für die Ausübung der Prüfertätigkeit.

Bei allen Kollegen des Instituts für Tragwerksplanung sowie der benachbarten Institute bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit, das harmonische Arbeitsklima und die vielen Ratschläge und Hilfen zur Erstellung dieser Arbeit.

Darüber hinaus danke ich den studentischen Hilfskräften, die ebenfalls zum Gelingen beigetragen haben. Einen großen Dank möchte ich auch allen Freunden aussprechen, die auf vielfältige Weise ausgleichend, unterstützend und beratend für mich waren. Meiner Familie danke ich für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Bearbeitungszeit. Besonderer Dank gebührt meinem Freund Marco, der wertvolle Unterstützung geleistet hat.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung.....	5
2	Hängedächer und artverwandte Konstruktionen – Grundlagen und Abgrenzung	7
2.1	Hängedächer.....	7
2.1.1	Definition und Bauformen	7
2.1.2	Tragverhalten und Lastableitung	9
2.1.3	Konstruktive Durchbildung und Stabilisierung	10
2.2	Artverwandte Konstruktionen.....	12
2.2.1	Spannstahldächer	12
2.2.2	Seilbinder und Spreizbinder.....	13
2.2.3	Gegenläufig gekrümmte Dächer	16
2.2.4	Membrandächer	18
2.2.5	Abgehängte Dächer.....	20
2.3	Charakteristische Unterscheidungsmerkmale	22
3	Entwicklung der Hängedächer	23
3.1	Von der Hängebrücke zum hängenden Dach.....	23
3.2	Konstruktive Weiterentwicklungen zur Versteifung hängender Dächer	26
3.3	Hängedächer mit netzförmigen und flächigen Zuelementen	30
3.4	Anwendung der Verspannung und Vorspannung	34
3.5	Entwicklung gestalterischer Vielfalt	36
3.6	Nutzung von Hängedächern in bauphysikalischen Gebäudekonzepten	39
3.7	Materialbezogene Weiterentwicklungen.....	41
4	Analyse der Formen von Hängedächern	43
4.1	Grundlagen.....	43
4.2	Trag- und Verformungsverhalten von Einzelseilen	43
4.3	Aufbau und Entwicklung von Hängedachformen.....	45
4.4	Formfindungsmodelle	48
4.5	Formenkatalog	50
4.6	Analyse und Bewertung.....	65
4.6.1	Kriterien zur Analyse und Bewertung	65
4.6.2	Zuggliedanordnung	66
4.6.3	Größe und Verteilung der Seilkräfte an der Auflagerlinie.....	68
4.6.4	Krümmung der Dachfläche.....	73
4.6.5	Dacheindeckung.....	80
4.6.6	Lastabtragung quer zu den Tragseilen	81
4.6.7	Zwischenunterstützungen.....	82
4.7	Modifikation von Hängedachformen	83
4.7.1	Modifikationsmöglichkeiten	83
4.7.2	Modifikationen an ausgewählten Beispielen	87
4.8	Schlussfolgerungen	96

5	Hängedachspezifische Einwirkungen und Tragsysteme	98
5.1	Grundlagen.....	98
5.2	Einwirkungen auf Hängedächer.....	98
5.2.1	Eigengewicht.....	98
5.2.2	Schnee.....	100
5.2.3	Wind.....	101
5.2.4	Vorspannung.....	104
5.2.5	Modellversuche und Probelastungen	104
5.3	Grundsätze zur Bemessung.....	108
5.4	Analyse der Lastabtragung am Gesamtsystem	109
5.4.1	Ansatzpunkt	109
5.4.2	Grundlagen zur Ausbildung und zum Lastabtrag am Gesamtsystem.....	109
5.4.3	Offene Randverankerungssysteme.....	112
5.4.4	Geschlossene Randverankerungssysteme	119
5.4.5	Zwischenunterstützungen.....	123
5.4.6	Verankerung im Baugrund.....	125
6	Konstruktive Ausbildung der Dachfläche	131
6.1	Grundlagen.....	131
6.2	Dachaufbau	131
6.2.1	Allgemeines	131
6.2.2	Zugelemente.....	133
6.2.3	Dacheindeckung.....	144
6.2.4	Bauablauf	152
6.3	Aussteifung und Stabilisierung	155
6.3.1	Einführung	155
6.3.2	Stabilisierung durch Eigengewicht	156
6.3.3	Stabilisierung durch Erzielung einer Schalentragswirkung mittels Vorspannung	159
6.3.4	Stabilisierung mit Hilfe von Abspannseilen	160
6.3.5	Stabilisierung durch Gegenspannseile	163
7	Anschlüsse von Zugelementen	165
7.1	Grundlagen.....	165
7.2	Seilanschlüsse	166
7.3	Spanngliedverankerungen in Beton	171
7.4	Stahlprofilträger-Anschlüsse.....	173
7.5	Blechanschlüsse	175
7.6	Holzanschlüsse.....	175
7.7	CFK-Verankerungen.....	177
8	Bauphysikalische Entwurfsaspekte.....	180
8.1	Entwässerung	180
8.2	Belichtung und Belüftung.....	185
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	203

10	Quellenverzeichnisse.....	205
10.1	Literaturverzeichnis	205
10.2	Weitere Quellen	214
10.3	Abbildungsverzeichnis.....	217
11	Anhang.....	231
11.1	Geografische Übersichten	231
11.2	Chronologische Übersicht.....	235
11.3	Gesamtverzeichnis der untersuchten Bauwerke	238

Anmerkung zu den in der Arbeit verwendeten Bauwerksnummern (BNr.)

Zu den in der Arbeit untersuchten Bauwerken sind Datenblätter mit zusätzlichen Bauwerksinformationen im Anhang (Kapitel 11) zusammengestellt. Die Zuordnung der Gebäude bzw. Tragwerke erfolgt anhand von Bauwerksnummern (BNr.), auf die auch im Text verwiesen wird.

1 Einleitung

Leichte, weit gespannte Flächentragwerke eignen sich aus statisch-konstruktiver Sicht hervorragend zur Überdachung großer Bauwerke, wie beispielsweise Stadien, Messe- und Sporthallen. Hierbei können hängende Konstruktionen unterschiedlichster Bauarten genutzt werden.

Das Hängedach stellt hierunter eine Sonderform dar, bei der die Tragkonstruktion der Dachfläche lediglich aus frei durchhängenden Zugelementen besteht. Neben der besonderen Art der Lastabtragung in der Dachfläche sind die sich einstellenden Dachformen und die charakteristischen Konstruktionen zur Lastweiterleitung kennzeichnend für diese Bauweise.

Hängedächer werden in der Praxis nur selten ausgeführt. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in den bauartbedingten komplexen Randbedingungen, die im Rahmen der Gesamtplanung des Bauwerks zu berücksichtigen sind. Zur Lösung der Entwurfsaufgaben stehen zudem bis heute nur wenige Informationen in der Fachliteratur zur Verfügung, die über die große Formenvielfalt und die verschiedenen Möglichkeiten der konstruktiven Umsetzung aufklären.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden daher umfassende Untersuchungen dieser besonderen Bauweise durchgeführt, die die wesentlichen Aspekte beim Entwerfen und Konstruieren von Hängedächern behandeln.

Grundlage der Betrachtungen ist die Definition der Bauart „Hängedach“ und deren Abgrenzung zu ähnlichen, artverwandten Konstruktionen. Die Aufarbeitung der Entwicklungsgeschichte der Hängedachbauweise zeigt verschiedene Perioden auf, die durch die Weiterentwicklung der Baumaterialien sowie durch Erfahrungen, die an ausgeführten Hängekonstruktionen gewonnen wurden, geprägt sind.

Basierend auf Untersuchungen an Einzelseilen wird eine analytische Methode zur Formfindung von Hängedachflächen entwickelt. Durch Anwendung dieses Verfahrens werden aus Seilen unter Variation der maßgebenden Parameter zahlreiche Dachformen erzeugt, die in einem Formenkatalog zusammengefasst sind. Darauf aufbauend erfolgen Analysen zur Form, zum Tragverhalten und zur Ausbildung von Hängedachflächen. Weiterhin werden die formbedingten Auswirkungen auf die abzuleitenden Auflagerkräfte untersucht und erläutert.

Hängedächer weichen aufgrund der Form und des Tragverhaltens von konventionellen Dachkonstruktionen ab. Die große Verformbarkeit, die konkave Dachoberfläche sowie die Abtragung der Seilkräfte erfordern eine besondere Beachtung. Daher werden Grundlagen zu hängedachspezifischen Einwirkungen und Bemessungsansätzen vorgestellt. Bauartbedingt sind bei Hängedächern hohe Horizontalkräfte abzuleiten, wobei unterschiedliche Konstruktionssysteme und Stütztragwerke zum Einsatz kommen können. Umfangreiche theoretische Erläuterungen zur Ableitung der Kräfte aus dem Hängedach werden durch entsprechende Anwendungsbeispiele ergänzt und hinsichtlich der Rahmenbedingungen ihrer Anwendung bewertet.

Bei der konstruktiven Durchbildung der leichten, schlanken und verformbaren Dachfläche von Hängedächern sind spezielle Anforderungen an die Zugelemente und die Dacheindeckung zu beachten. Verschiedene Ausführungsmöglichkeiten werden in Abhängigkeit von dem Baustoff und der Querschnittsform vorgestellt und anhand von geplanten und gebauten Beispielen erläutert. Weiterhin sind die aus dem Tragverhalten von Hängedächern resultierenden Dachverformungen und die Schwingungsanfälligkeit durch geeignete konstruktive Maßnahmen auf ein unschädliches Maß zu begrenzen. Die speziell für Hängedächer geeigneten baulichen Möglichkeiten zur Aussteifung und Stabilisierung der Dachfläche werden analysiert, erläutert und durch konstruktive Ausführungsvorschläge ergänzt.

Die hoch beanspruchten Anschlüsse der Zugelemente an die Verankerungskonstruktion können die Tragfähigkeit der Dachkonstruktion maßgebend begrenzen und sind daher ein entscheidender Detailpunkt bei der Planung von Hängedächern. Hierzu werden materialabhängig verschiedene Verbindungsarten aufgezeigt und entsprechend den Ausführungsmöglichkeiten der Zugelemente an Anwendungsbeispielen erläutert.

Die besondere Form von Hängedächern beeinflusst die Dachentwässerung und bietet bauphysikalische Vorteile, die zur Belichtung und Belüftung des überdachten Raumes genutzt werden können. Die daraus resultierenden Entwurfsaspekte werden anhand von realisierten Bauwerken vorgestellt.

Die vorliegende Arbeit betrachtet konstruktionsspezifische Randbedingungen für den Entwurf und die Planung von Hängedächern. Die im Hauptteil zusammengestellten Grundlagen und erarbeiteten Ergebnisse werden durch eine Übersicht geplanter und ausgeführter Hängedach-Konstruktionen im Anhang ergänzt.

2 Hängedächer und artverwandte Konstruktionen – Grundlagen und Abgrenzung

2.1 Hängedächer

Frei Otto zeigte in seiner Dissertation „Das hängende Dach“ aus dem Jahr 1954 die große Formenvielfalt sowie wichtige Grundlagen zum Tragverhalten leichter Dachkonstruktionen auf, ohne jedoch die beschriebenen Tragwerke genau abzugrenzen. Diese Arbeit führte in der Folge zu einer verstärkten Auseinandersetzung mit leichten Flächentragwerken. Der Begriff „Hängedach“ wird hierbei sowohl in der Fachliteratur als auch im allgemeinen Sprachgebrauch in Zusammenhang mit vielen unterschiedlichen Dachkonstruktionen, meist weit gespannten, leichten Flächentragwerken, verwendet. Eine einheitliche Definition existiert jedoch nicht.

In dieser Arbeit soll diese Unschärfe bereinigt werden, indem zwischen „echten“ Hängedächern und artverwandten Konstruktionen unterschieden wird.

2.1.1 Definition und Bauformen

Ein Hängedach wird definiert als eine mindestens in einer Richtung negativ gekrümmte (durchhängende) Dachkonstruktion, bei der die tragenden Elemente in der Ebene der Dachhaut liegen (Bild 2-1).

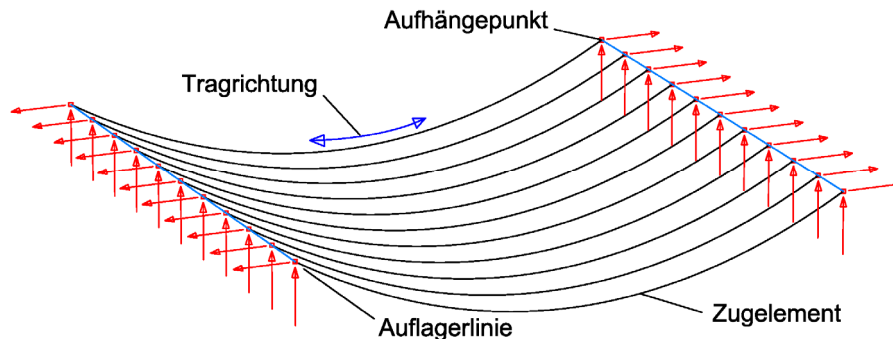


Bild 2-1 Aufbau einer einseitig negativ gekrümmten Dachfläche eines Hängedachs

Die Krümmung der Dachfläche stellt sich in Abhängigkeit von den Randbedingungen, z. B. der auf das Dach wirkenden Belastung, ein. Die Dachhaut wird entweder selbst als Zugelement ausgebildet (Membrandach) oder zumindest in die Ebene der tragenden Zugelemente integriert. Beim Hängedach ergibt sich daher eine Bauform, die mit der Raumform identisch ist.

Die Tragelemente verlaufen bei rechteckigen Grundrissen in der Regel parallel, bei runden Grundrissen sind sie meist radial angeordnet. Je nach Grundrissgeometrie sind darüber hinaus andere Verläufe möglich, bei denen sich die Tragelemente auch überschneiden können, wie z. B. bei Netzstrukturen. Die Dachflächen von Hängedächern sind entlang der Tragrichtung gekrümmt, können bei entsprechender Ausbildung der Zugelemente aber auch quer dazu eine Krümmung aufweisen.

Werden rechtwinklig zu zwei parallelen Auflagerlinien frei durchhängende, parallel verlaufende Tragelemente angeordnet, so entsteht eine einseitig gekrümmte Dachfläche (Bild 2-2). Sie lässt sich aus einer Hängelinie über eine Gerade generieren und überspannt einen rechteckigen Grundriss. Der Längsschnitt zeigt dann eine sogenannte Seil- oder Kettenlinie (siehe Kapitel 4.2), deren Verlauf annähernd parabolisch ist.

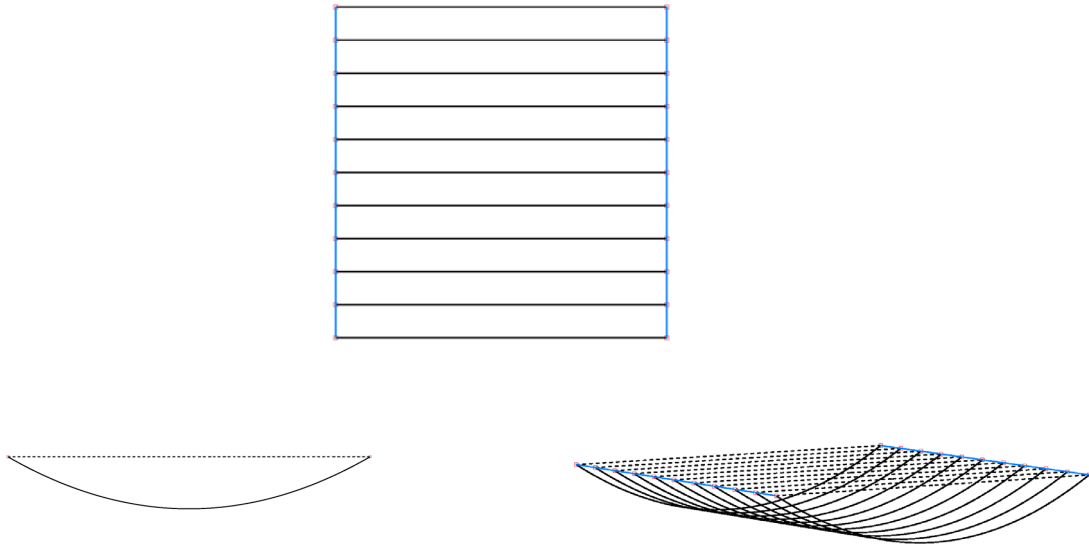


Bild 2-2 Hängefläche zwischen parallelen, gradlinigen Auflagern: Draufsicht (oben), Längsschnitt (links) und Isometrie (rechts)

Über kreisförmigem Grundriss können die Zuelemente von einem Punkt des Umfangs zum jeweils gegenüberliegenden Punkt spannen (Bild 2-3). Es stellt sich dann ein radialer Verlauf ein, bei dem sich die Elemente in einem mittleren Punkt treffen.

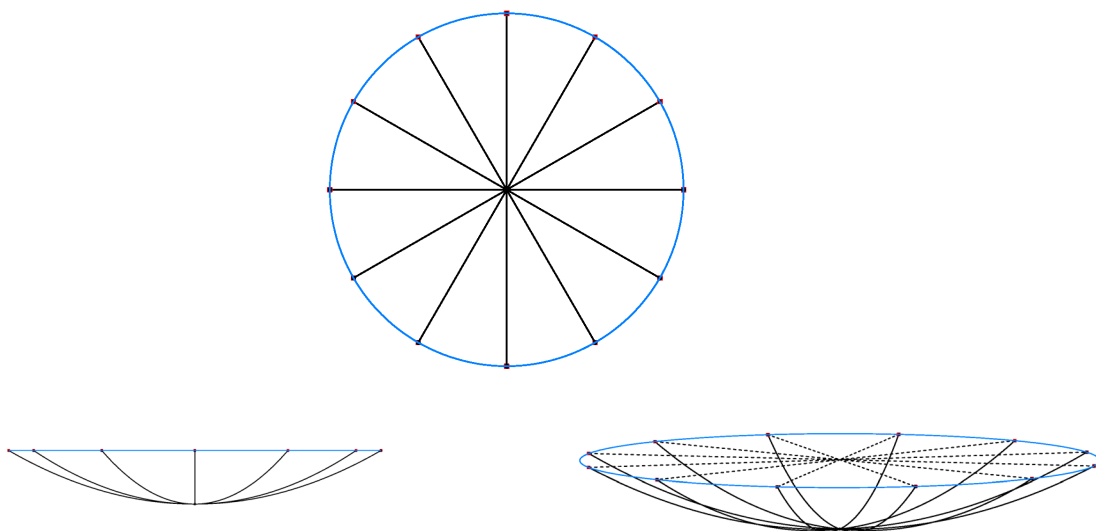


Bild 2-3 Hängefläche innerhalb eines Kreisrings: Draufsicht (oben), Längsschnitt (links) und Isometrie (rechts)

Durch Anpassung der Zuelemente sowie der Randbedingungen sind mit Hängedächern unterschiedlichste Grundrissformen mit vielfältigen Seilanordnungen überspannbar. Ausführliche Betrachtungen möglicher Formen von Hängedächern und formbedingten Auswirkungen auf das gesamte Bauwerk erfolgen in Kapitel 4.

2.1.2 Tragverhalten und Lastableitung

Die Tragelemente von Hängedächern können als ideal biegeweich angenommen werden und sind somit ausschließlich auf Zug beansprucht. Das Tragverhalten jedes einzelnen Elements entspricht dem eines zwischen zwei Punkten hängenden Seils. Hängedächer können daher als eine Kombination vieler Seile betrachtet werden.

Das in Bild 2-4 dargestellte Tragwerksmodell eines Dachs über rechteckigem Grundriss verhält sich wie eine Schar parallel hängender Seile. Die Dachlasten – in den folgenden Bildern vereinfachend durch Einzellastpfeile dargestellt – werden den Tragelementen zugeordnet und als Zugkräfte entlang der Seile zu den Auflagern abgeleitet. Ein Lastabtrag quer zur Tragrichtung der Zuelemente ist bei diesem idealisierten Tragwerksmodell nicht vorgesehen. Bei runden Dachformen erfolgt der Lastabtrag entsprechend in radialer Richtung zum äußeren Rand (Bild 2-5).

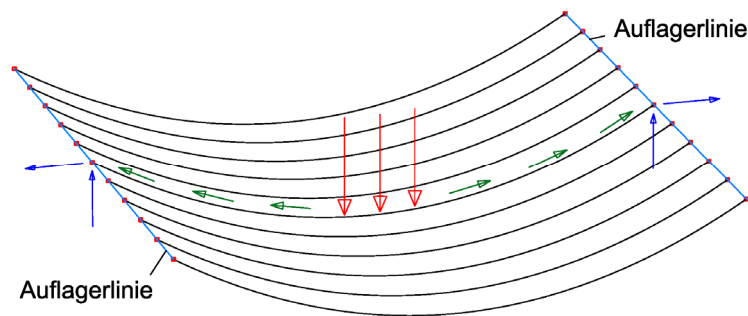


Bild 2-4 Lastabtrag bei rechteckigem Grundriss und parallelen Auflagerlinien (Isometrie)

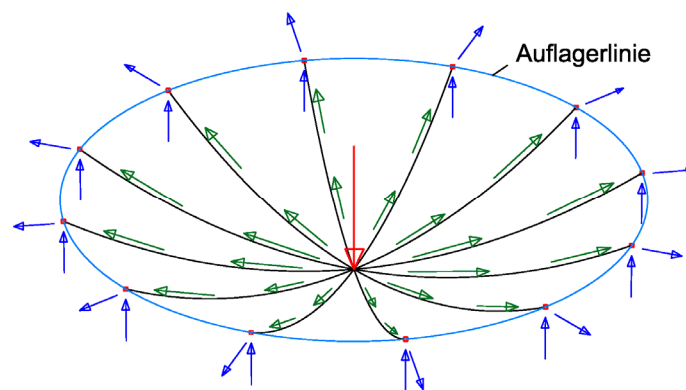


Bild 2-5 Lastabtrag bei kreisrundem Grundriss (Isometrie)

Da die Haupttragelemente Lasten in der Dachfläche ausschließlich über Zug abtragen, sind im Gegensatz zu druck- oder biegebeanspruchten Konstruktionen biegeweichere Querschnitte mit gerin-

gen Querschnittshöhen einsetzbar. Bei Verwendung von Materialien hoher Zugfestigkeit sind somit Dachflächen mit minimalem Materialeinsatz möglich.

Hängedächer weisen im Allgemeinen ein relativ geringes Eigengewicht auf. Ihre leichte Konstruktionsweise führt jedoch auch dazu, dass sie besonders empfindlich gegenüber antisymmetrischen und abhebenden Einwirkungen sind.

Aufgrund der besonderen Form und Verformbarkeit von Hängedächern können normierte Lastansätze für Wind- und Schneelasten nur bedingt verwendet werden. In der Regel erfordern Hängedächer genauere Betrachtungen hinsichtlich der Größe und Verteilung von Wind- und Schneelasten. Kapitel 5.2 enthält vertiefende Betrachtungen zu den wesentlichen Einwirkungen auf Hängedächer sowie zu Methoden ihrer Ermittlung und Beschreibung.

Eine kennzeichnende Gemeinsamkeit von Hängedachtragwerken ist die Aufnahme und Ableitung der Auflagerkräfte der Zuelemente. An den Aufhängepunkten der Zuelemente treten große horizontale Auflagerkräfte auf, die mit geeigneten, für Hängedächer charakteristischen Konstruktionen abgetragen werden müssen. Für die Randausbildung stehen verschiedene Tragelemente zur Verfügung, die entscheidenden Einfluss auf die Gestalt des Randes und der Dachfläche sowie auf den weiteren Kräfteverlauf haben. Ausführliche Beschreibungen über die Ableitung der Kräfte aus dem Hängedach bis in den Baugrund erfolgen in Kapitel 5.4.

2.1.3 Konstruktive Durchbildung und Stabilisierung

Die idealisierten Tragwerksmodelle gehen davon aus, dass keine Lastableitung quer zur Spannrichtung erfolgt. Dies bedeutet, dass jedes Seil unabhängig von den Nachbarseilen Lasten abträgt und sich dabei entsprechend verformt. In Bild 2-6 ist dargestellt, wie eine Seilschar unter Einzellasten verformt wird. Aus Gründen der Verträglichkeit und zur Lastverteilung ist in der Regel eine Tragwirkung quer zur Tragrichtung der Zuelemente sinnvoll.

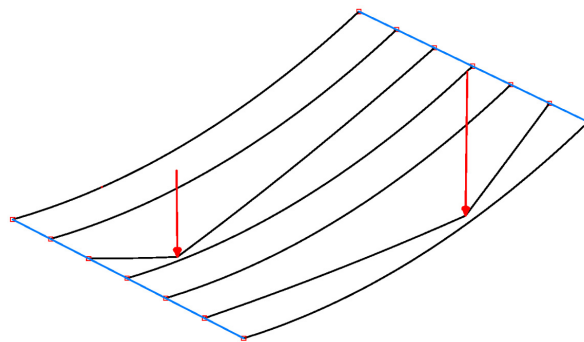


Bild 2-6 Verformung der Zuelemente eines Hängedachs unter Einzellasten

Durch die Anordnung von Querträgern, die biegesteif, rechtwinklig zur Seilachse über mehrere Tragseile verlaufen, kann die Lastabtragung beeinflusst werden. Dieser Konstruktionstyp wird nach Frei Otto als „Seil-Trägernetz“ bezeichnet (Bild 2-7).

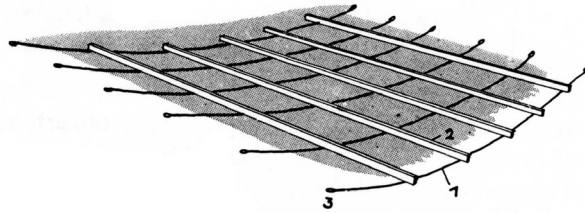


Bild 2-7 Seil-Trägernetz: Tragseile (1), Querträger (2), Aufhängepunkte (3) [Otto 1954]

Bei Seil-Trägernetzen werden nicht nur Einzellasten (Bild 2-8), sondern auch quer zur Tragrichtung veränderliche Flächenlasten aus Wind oder Schnee weitgehend gleichmäßig auf alle Seile verteilt.

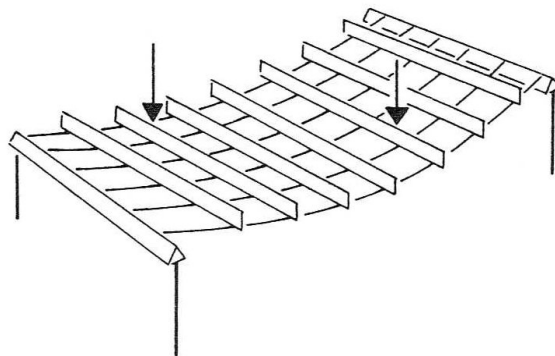


Bild 2-8 Verteilung von Einzellasten bei Seil-Trägernetzen [Siegel 1960]

Als Querträger können leichte biegesteife Elemente verwendet werden. Sie sind in der Regel nur gering biegebeansprucht, da sie wie ein vielfach elastisch aufgelagerter Balken mit kurzen Spannweiten – dem Abstand der Tragseile – mit begrenzten Dachlasten wirken. Sie müssen nicht immer geradlinig verlaufen, sondern können derart gebogen sein, dass sie dem Dach eine beliebige Krümmung in Querrichtung ermöglichen, beispielsweise zur Dachentwässerung. Das Dach hängt weiterhin frei durch, seine Form wird bestimmt durch die angreifenden Lasten. Trotz der stabilisierenden Wirkung der Träger in Querrichtung bleibt der Lastabtrag in Längsrichtung unverändert.

Statt einzelner Querträger kann eine flächige, biegesteife Dacheindeckung genutzt werden, die über mehrere Tragseile verläuft und so eine Querverteilung ermöglicht sowie gleichzeitig den Raumabschluss bildet. Die konstruktive Durchbildung der Dachfläche, speziell der Zuelemente und der Dacheindeckung, wird in Kapitel 6.2 behandelt.

Die Lastabtragung, bei der sich die Zuelemente der Belastung folgend verformen, führt in Kombination mit der typischerweise leichten Bauweise der Hängedachfläche dazu, dass bereits geringe veränderliche Einwirkungen zu großen Dachverformungen führen.

Speziell Einwirkungen aus Wind können im Tragsystem der Hängedächer zu Stabilitätsproblemen führen, die sich in Flattererscheinungen und Schwingungen der Dachfläche äußern (Bild 2-9). Soglasten stellen eine Gefahr dar, wenn sie das Eigengewicht des Daches übersteigen, die Dachfläche anheben und im äußersten Fall nach oben durchstülpen (Bild 2-10).

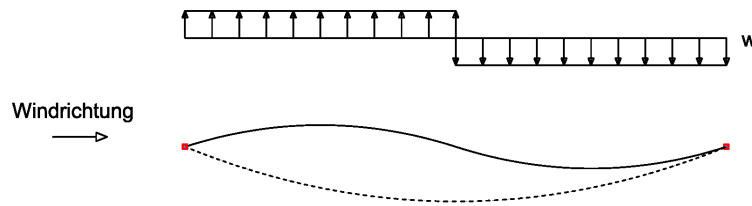


Bild 2-9 Verformung eines Hängedachs unter in Längsrichtung antimetrischer Windlast

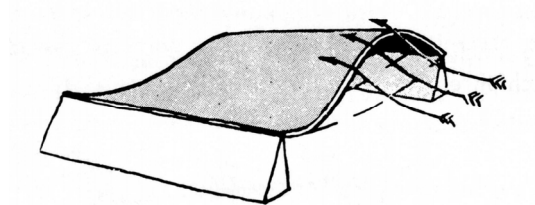


Bild 2-10 Gefahr des Durchstülpens bei Windangriff in Querrichtung [Otto 1954]

Die Stabilisierung der Dachfläche sowie die Ausbildung der Dachhaut und Anschlüsse stellen daher hohe Anforderungen an die Planung und Konstruktion von Hängedächern. In Kapitel 6.3 werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, erläutert und bewertet.

2.2 Artverwandte Konstruktionen

2.2.1 Spannstahldächer

Spannstahldächer bestehen aus dünnen, parallel in einem Abstand von 0,5 m bis 2 m angeordneten Seilen, die zwischen zwei Verankerungsbauten stark vorgespannt und verankert werden (Bild 2-11).

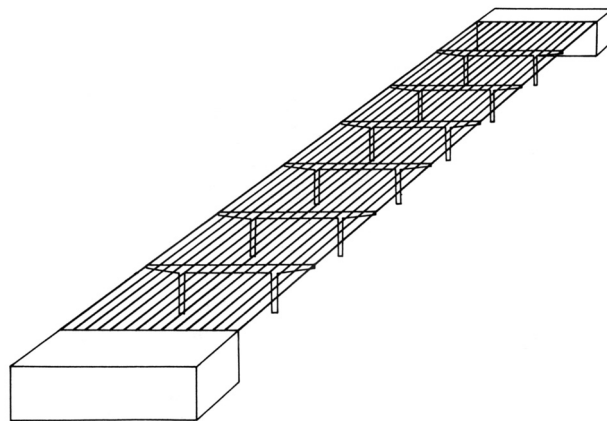


Bild 2-11 Spannstahldach zwischen massiven Endbauwerken (offenes System) [Rickenstorf 1982]

Die Anwendung ist für rechteckige, lang gestreckte und flache Gebäude besonders geeignet, beschränkt sich jedoch auf kleine Spannweiten, da die Durchhänge der Zügelemente mit steigender Feldlänge überproportional ansteigen. Die Dachdeckung kann mit einer leichten, schwingungsresistenten Dachhaut erfolgen. Da der Durchhang der Seile sehr klein sein muss (etwa $\frac{1}{50}$ der Spannweite), rufen die Dachlasten schon bei relativ geringen Einzelspannweiten der Seile große

Horizontalreaktionen hervor. Die Ableitung der hohen Horizontalkräfte erfolgt in der Regel über massive Endbauwerke oder Stützböcke in den Baugrund. Alternativ ist auch eine Ausbildung als geschlossenes System möglich (vergleiche Kapitel 5.4). Die als Dachpfetten fungierenden Spannseile bedürfen einer Unterstützung durch Binder im Abstand von etwa 6 m bis höchstens 20 m.

Die Dachfläche wird durch die starke Vorspannung stabilisiert, auf zusätzliche Längsverbände im Dach kann daher verzichtet werden. Die Zwischenbinder können durch die Verbindung mit den Seilen am Obergurt durch die horizontale Halterung am Kippen gehindert werden.

Spannstahldächer eignen sich für Bahnsteigdächer sowie für den Einsatz bei Industrie- und Landwirtschaftsbauten. Sie unterscheiden sich von Hängedächern durch ihre weitgehend ebene Form, die infolge der starken Vorspannung der Zügelemente erreicht wird.

2.2.2 Seilbinder und Spreizbinder

Seilbinder-Dächer sehen Hängedächern zunächst sehr ähnlich. Bei ihnen wird, um die durchhängenden, zur Aufnahme der Dachlasten bestimmten Tragseile zu stabilisieren, in gleicher vertikaler Ebene eine entsprechende Schar von gegensinnig gekrümmten Spannseilen angeordnet. Die annähernd gleich tragfähigen Trag- und Spannseile sind durch Stäbe oder Seile verbunden und bilden gemeinsam den ebenen Binder.

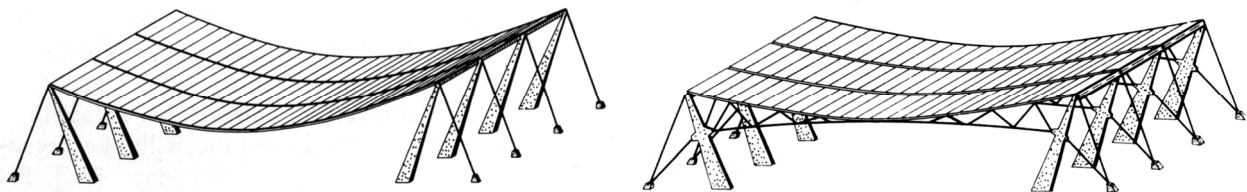


Bild 2-12 Vergleichende Gegenüberstellung [Rühle 1970]

links: Hängedach

rechts: Seilbinder-Dach

Bild 2-12 zeigt links ein Hängedach über rechteckigem Grundriss, rechts ist ein Seilbinder-Dach dargestellt. Das Hängedach wird durch die Ergänzung von unterhalb der Dachfläche angeordnete Spann- und Diagonalseile sowie eine weitere seitliche Abspannung in Höhe der Spannseile zum Seilbinderdach. Im Gegensatz zu Hängedächern werden die Seile planmäßig vorgespannt, wodurch die Dachform beeinflusst wird (Bild 2-13).

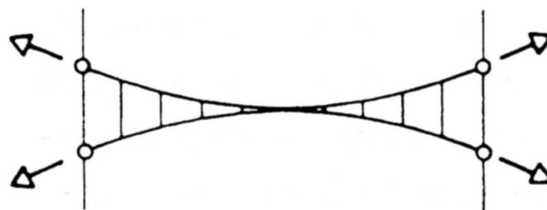


Bild 2-13 Prinzip der Vorspannung durch gegensinnig gekrümmte Spannseile [Krauss 2000]

Verläuft das Tragseil vollständig oberhalb des Spannseils, werden die Verbindungselemente ausschließlich auf Zug beansprucht und können daher ebenfalls als Seil ausgeführt werden. Diese Konstruktionstypen werden als „Seilbinder“ bezeichnet.

Das Spannseil kann auch oberhalb des Tragseils angeordnet werden. In diesem Fall wirken die Verbindungselemente als druckbeanspruchte Spreizen. Es handelt sich um einen „Spreizbinder“.

Eine dritte Möglichkeit besteht in einer Überschneidung von Trag- und Spannseilen, also einer gemischten Konstruktion, bei der die Verbindungselemente in Bindermitte als Spreizen, an den Rändern als Zugverbindungen wirken. Bild 2-14 zeigt diese drei Bindertypen.

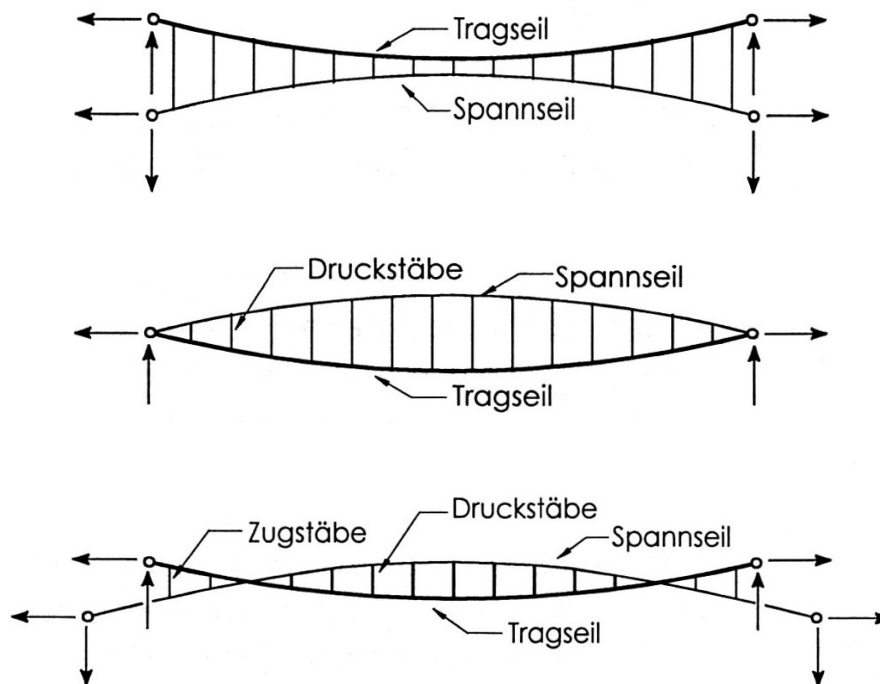


Bild 2-14 oben: Seilbinder
mittig: Spreizbinder
unten: gemischte Konstruktion [Leicher 2002]

Einwirkungen aus Eigengewicht, Schnee und Winddruck werden von den Tragseilen aufgenommen. Für den Fall starker abhebender Windsogkräfte vertauschen Trag- und Spannseile ihre Funktionen, d. h. die Lasten werden dann von den Spannseilen aufgenommen.

Die durch die Verbindung von Trag- und Spannseil resultierende stabilisierende Wirkung wird verstärkt, wenn der Verbund durch Diagonalen schubfest ausgeführt wird. Diese Konstruktion wird nach ihrem Erfinder David Jawerth (schwedischer Ingenieur, 1920-1998) als „Jawerth-Träger“ bezeichnet (Bild 2-15). Auch einseitige Lasten können bei dieser Ausführungsart mit geringen Verformungen aufgenommen werden.

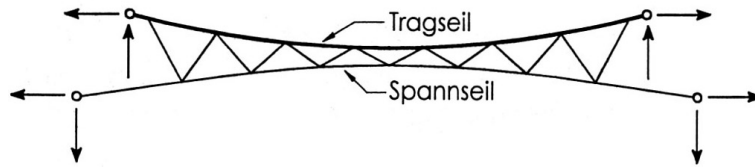


Bild 2-15 „Jawerth-Träger“ [Krauss 2000]

Die Seil- oder Spreizbinder können bei rechteckigen Grundrissen parallel hintereinander oder bei kreisförmigen Grundrissen radial angeordnet werden. Der Abstand der Binder ergibt sich aus der Art der Dacheindeckung und liegt typischerweise bei etwa 3 m bis 9 m.

Bei kreisförmigen Grundrissen werden drei Grundformen der Seilanordnung unterschieden. Die Spreizung zwischen Ober- und Unterseil kann entweder ausschließlich am äußeren Rand, am inneren Zugring oder an beiden Rändern gleichzeitig erfolgen, so dass sich die Seile kreuzen (siehe Bild 2-16). Radial angeordnete Spreizbinder werden auch „Kissen“ genannt. Die Verankerung der radial verlaufenden Seilbindergurte erfolgt wie beim kreisrunden Hängedach an einem äußeren Druckring und einem inneren Zugring.

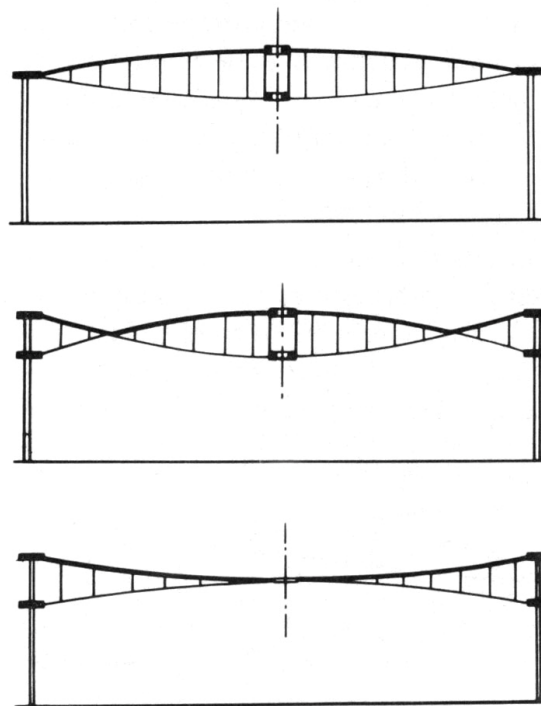


Bild 2-16 Möglichkeiten der Spreizung bei radialen Systemen [Rabinovič 1966]

Sowohl Seil- als auch Spreizbinder zeichnen sich durch eine geringe Bauhöhe aus. Bei der gemischten Konstruktion kann die Bauhöhe noch weiter reduziert werden. Bei typischen Hallenbauten kommen Spannweiten von 40 m bis 120 m zum Einsatz. Bei zweilagiger Anordnung der Seilscharen kann der Raum zwischen den Seilen genutzt werden, um dort z. B. Versorgungskanäle und Leitungen anzuordnen.

In Vergleich zum Hängedach wird die Dachform durch die Zug- oder Druckkräfte der Verbindungselemente fixiert. Durch den zusätzlichen Einbau von Spannseilen und Verbindungselementen entsteht ein deutlich höherer Materialverbrauch. Je bauchiger die Konstruktion des Seil- oder Spreizbinders ausgeführt wird, desto kleiner werden die aufzunehmenden horizontalen Auflagerkräfte. Gleichzeitig verlängern sich jedoch die Verbindungselemente, was zu höheren Kosten bzw. bei Spreizen zu einer erhöhten Knickgefahr führt. Spreizsysteme sind zudem kippgefährdet. Sie benötigen bei paralleler Anordnung zusätzlich einen Kippverband quer zu ihrer Ebene.

Die Dachhaut liegt in der Ebene der Tragseile, kann aber z. B. aus Gründen der Entwässerung auch in die Ebene der Spannseile verlegt werden. In diesem Fall weicht die Konstruktion sowohl im Tragverhalten als auch im Erscheinungsbild vom Hängedach ab.

2.2.3 Gegenläufig gekrümmte Dächer

Gegenläufig gekrümmte Dächer werden aus zweischarigen, doppelt gekrümmten, vorgespannten Seilen generiert, die dadurch antiklastische Flächen ausbilden. Durch die Verbindung zweier sich kreuzender Seilscharen in den Kreuzungspunkten entstehen Seilnetze. Im Gegensatz zu hängenden Seilnetzen ist bei diesem Dachtyp nur eine Seilschar (die „Tragseile“) negativ (hängend), die andere (die „Spannseile“) jedoch positiv gekrümmt (Bild 2-17).

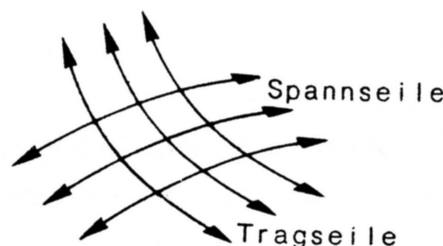


Bild 2-17 Entgegengesetzt gekrümmte Trag- und Spannseile [Krauss 2000]

Die Seilnetze werden vorgespannt und umlaufend durch räumlich gekrümmte Randträger gehalten. Sie eignen sich für weit gespannte Flächentragwerke und zeichnen sich durch eine besonders hohe Formenvielfalt aus. Durch die gegenläufige Krümmung der Zugelemente wird eine effektive Aussteifung der Dachfläche gewährleistet, die sie weitgehend unabhängig von der Belastung in ihrer Lage fixiert. In der Regel sind keine weiteren Maßnahmen zur Aussteifung (z. B. durch Abspannungen) erforderlich, so dass diese Dächer mit einem sehr geringen Eigengewicht ausgeführt werden können.

Die Bestimmung günstiger Flächenformen, besonders bei komplizierten Arten der Rand- und Mittelunterstützung, kann mit experimentellen Methoden (Seifenhaut-, Textil- und Drahtnetzmodellen) oder computergestützt erfolgen.

Seilnetzkonstruktionen ermöglichen das Überspannen unterschiedlichster Grundrissformen. Die Ränder können linear (Randbalken bzw. Randträger), gekrümmt (Randseile oder Randbogen) oder punktförmig (Abspannpunkte) sein (Bild 2-18).

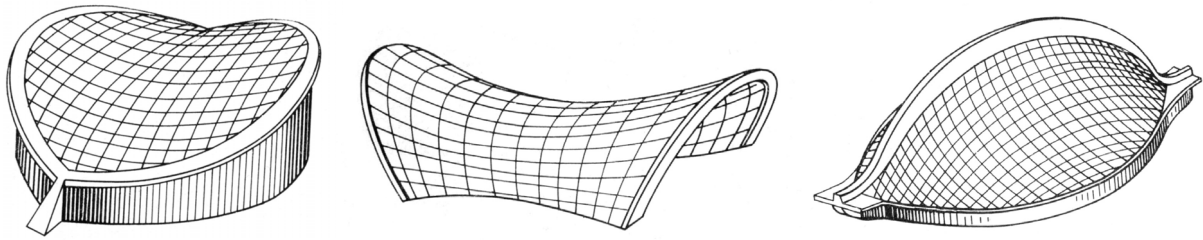


Bild 2-18 Konstruktionsformen für zweisecharige, doppelt gekrümmte Seiltragwerke [Rühle 1970]

links und mittig: Fläche zwischen Randbogen

rechts: Fläche zwischen Rand- und Mittelbogen

Die zur Randverankerung dienenden Träger, Bogen oder Seile sollten aus statischen Gesichtspunkten in der Ebene des Daches liegen. Werden Randseile verwendet, entsteht ein nachgiebiges System mit größeren Verformungen (Bild 2-19 und Bild 2-20).



Bild 2-19 Begrenzung mit Randseilen zwischen tiefen Verankerungspunkten (links) [Bräuer 1971], zwischen Hoch- und Tiefpunkten mit Grat- und Kehlseilen (rechts) [Büttner 1985]



Bild 2-20 Seilnetzkonstruktionen [Büttner 1985]

links: mit zwei Randbogen

rechts: mit geraden Randträgern

Zwischenunterstützungen können punktuell oder linear ausgeführt werden. Punktuell Stützungen durch Maste oder Abspannseile bewirken an dieser Stelle eine starke Beanspruchungskonzentration. Durch die Anordnung eines Tragrings oder Augenseils werden Spannungsspitzen abgemindert (Bild 2-21). Lineare Zwischenstützungen können durch Bogen, aber auch durch eingezogene Grat- oder Kehlseile erfolgen.

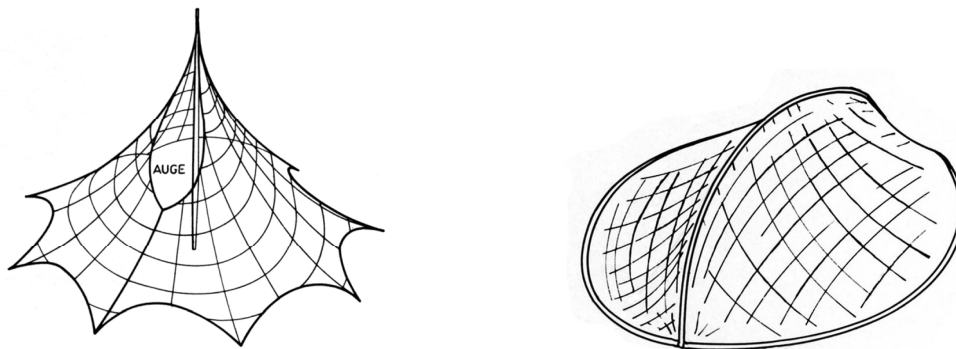


Bild 2-21 Seilnetzkonstruktionen

links: mit Mast und Augenseil [Rickenstorf 1982]

rechts: mit Bogen als Zwischenstützung und Randbogen [Makowski 1963]

Gegenläufig gekrümmte Dächer werden genau wie Hängedächer den weit gespannten, leichten Flächentragwerken zugeordnet. Durch die Anordnung einer gegenläufigen, vorgespannten Seilschar bilden sie jedoch Konstruktionen, deren Tragseile nicht frei durchhängen, sondern in ihrer Lage fixiert sind. Aufgrund dieser Eigenschaften unterscheiden sich gegenläufig gekrümmte Dächer deutlich von Hängedächern.

2.2.4 Membrandächer

Eine weitere Dachkonstruktion, die zu den weit gespannten, leichten Flächentragwerken zählt, sind Membrandächer. Unter einer Membran versteht man eine dünne, biegeeweiche, gespannte Haut. Im Gegensatz zu Seilen, die rein lineare Tragelemente sind und erst als Seilnetz flächig wirken können, stellen Membranen flächige Konstruktionen dar. Ihre Formen sind vielfältig und entsprechen denen der gegensinnig gekrümmten Dächer. Statt eines Seilnetzes mit Eindeckung werden sowohl tragende als auch raumabschließende Funktionen von der Membran übernommen.

Membrane für Dächer können aus (beschichtetem) Gewebe mit Kunst- oder Naturfasern, aus Folien oder aus Blech bestehen. Aufgrund ihrer Konstruktionsart sind Membrane für Bauwerke mit viel-schichtigem Dachaufbau weniger geeignet. Während Seilnetzkonstruktionen mit Ausfachung vor-wiegend für dauerhafte Bauten Anwendung finden, kommen Membrane primär bei temporären, fliegenden Bauten mit kleineren Abmessungen zum Einsatz.

Genau wie Seile haben Membrane die Eigenschaft, nur Zugkräfte aufnehmen und an ihre Ränder weiterleiten zu können. Da frei verlegte Membrane bei Windeinwirkung äußerst instabil sind, werden sie in der Regel für konstruktive Zwecke gegensinnig gespannt. Stützungen können mit Masten, Streben, Seilschlaufen oder Buckel, gegengespannten Seilen oder Druckbogen erfolgen (Bild 2-22 und Bild 2-23). Die Randverankerung erfolgt bei Membranen häufig durch Randseile.

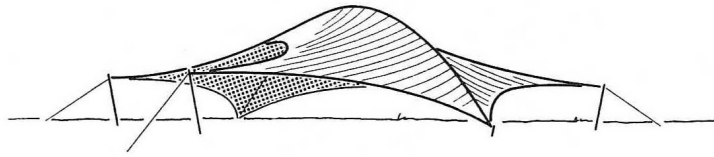


Bild 2-22 Membrankonstruktion mit Mitteldruckbogen, Entwurf: Frei Otto [Siegel 1960]

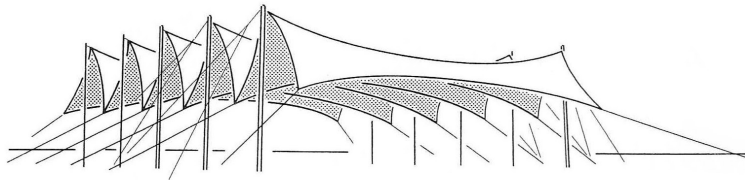


Bild 2-23 Membrankonstruktion mit Grat- und Kehlseilen, Entwurf: Frei Otto [Siegel 1960]

In Membrankonstruktionen sollte die Krümmung an jeder Stelle des Daches doppelt gegensinnig sein [Krauss 2000] und ebene Stellen vermieden werden [Otto 1953-2], um die Stabilität der dünnen Haut zu gewährleisten. Beim Entwurf leichter Membrandächer ist die Dachform hinsichtlich einer effektiven Entwässerung zu untersuchen, um die Bildung von Wasseransammlungen zu vermeiden. Formfindungsuntersuchungen können mit Seifenhaut-Experimenten durchgeführt werden.

Die bekannteste Bauart der Membrankonstruktionen ist das Zelt. Zelte sind traditionelle, temporäre Bauten. Sie sind schnell auf- und abbaubar, leicht zu zerlegen und aufgrund des geringen Materialbedarfs ohne großen Aufwand zu transportieren. Durch eine stetige Verbesserung der Zeltbaumaterialien werden immer größere Spannweiten und Nutzungsdauern möglich.

Einen Spezialfall der Membrankonstruktionen stellen nicht vorgespannte Membranen dar. Die als Sonnensegel oder Markisen bekannten Konstruktionen sind Hängedächer mit besonders geringer Formbeständigkeit. Es handelt sich um sehr leichte, frei durchhängende, nicht vorgespannte Konstruktionen. Eine solche, meist einachsige hängende Membran stellt gleichzeitig Haupttragelement und Dachhaut dar und bleibt auf das statisch erforderliche Gewicht beschränkt. Sie kann daher als das ideale Hängedach betrachtet werden.

Die folgenden Bilder (Bild 2-24 und Bild 2-25) zeigen verschiedene Beispiele für hängende Membranen, die als Sonnensegel bzw. Markise genutzt werden. Diese untergeordneten, temporären Konstruktionen tragen neben ihrem Eigengewicht in der Regel keine weiteren Lasten ab.

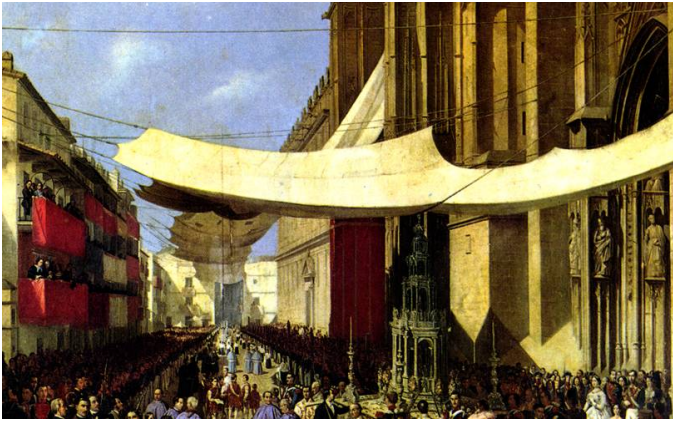


Bild 2-24 Beispiele für frei hängende Membranen

links: Velas, Gemälde „Fronleichnamsprozession in Sevilla“ von Manuel Cabral, 1858 [Smith 1968]

rechts: Eingangsbaldachin, Burg Bled (Slowenien), 2009 [Foto: Berthold Burkhardt]

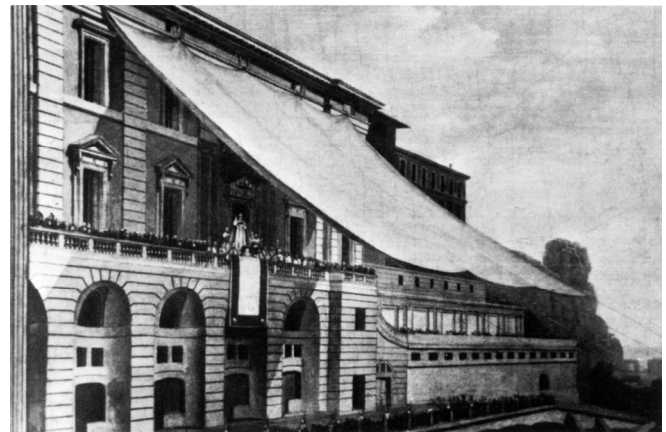


Bild 2-25 Beispiele für frei hängende Membranen

links: Markise am Kanzlerbungalow, Bonn, 1964; Architekt: Sep Ruf [Foto: B. Burkhardt]

rechts: Markise in Terracina (Italien), 1795 [Graefe 1982]

Membrandächer zur Überdachung größerer Grundrisse unterscheiden sich von Hängedächern durch ihre gegensinnige Krümmung, die aus der erforderlichen Vorspannung resultiert. Einachsige freihängende Membrandächer stellen ein ideales Hängedach dar, eignen sich jedoch nur für untergeordnete Konstruktionen und werden daher im Folgenden nicht näher betrachtet.

2.2.5 Abgehängte Dächer

Das Tragsystem des abgehängten Dachs ähnelt dem einer Hänge- oder Schrägseilbrücke. Bei dieser Konstruktionsart wird eine biegesteife Dachfläche durch Seile oder ähnliche Konstruktionselemente unterstützt. Anders als beim Hängedach hängt die steife Dachfläche in einem Abstand unterhalb der Zügelemente (siehe Bild 2-26).



Bild 2-26 Abgehängtes Dach der Papierfabrik in Mantua, Ingenieur: Pier Luigi Nervi [Krauss 2000]

Die Dachlasten werden hierbei über Biegung zu den Seilangriffspunkten abgetragen, über Schräg- oder Vertikalseile zu mittleren oder seitlichen Pylonen bzw. Stützen geleitet und von diesen in den Baugrund abgeführt. Der Winkel zwischen der Dachebene und den Hängegliedern bestimmt die Größe der in die Dachfläche eingetragenen Normalkräfte. Bild 2-27 zeigt verschiedene Möglichkeiten der Abhängung.

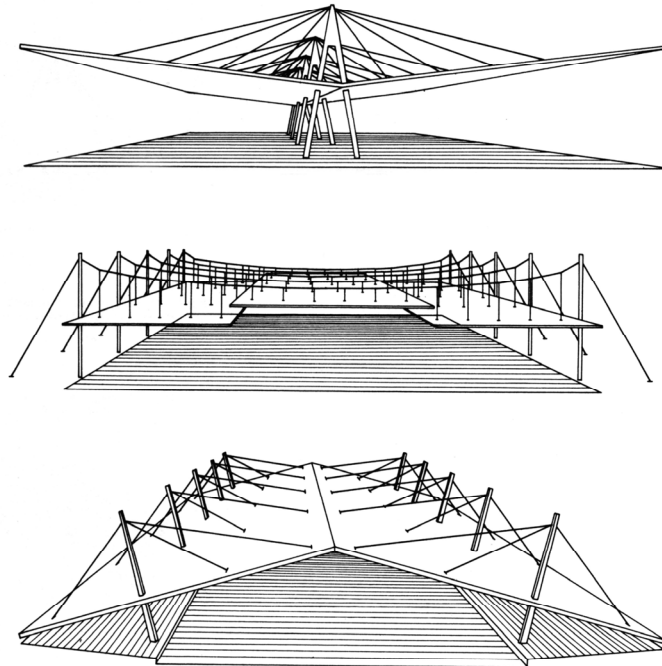


Bild 2-27 Abgehängte Dächer [Rickenstorf 1982]

oben: Abhängung von Mittelpylonen
mittig: Abhängung von Tragseilen
unten: Abhängung von Seitenpylonen

Abgehängte Dächer unterscheiden sich deutlich von Hängedächern, da ihre Dachfläche biegesteif ist, die Zuelemente nicht in der gleichen Ebene wie die geschlossene Dachfläche liegen und der Lastabtrag daher maßgeblich abweicht.

2.3 Charakteristische Unterscheidungsmerkmale

In der Fachliteratur und im allgemeinen Sprachgebrauch erfolgt begrifflich keine klare Trennung zwischen „hängenden“ Dächern unterschiedlicher Konstruktionssysteme. Basierend auf der Zusammenstellung weit gespannter, leichter Flächentragwerke und ihrer Eigenschaften können für Hängedächer charakteristische Merkmale definiert werden, die sie von artverwandten Konstruktionen abgrenzen. Demnach gelten für Hängedächer folgende Kriterien:

- tragende Elemente ausschließlich in der Ebene der Dachhaut
- konvexe Dachform in Haupttragrichtung belastungsabhängig entsprechend der Seillinie
- Lastabtrag ausschließlich über Zugbeanspruchung in den biegeweichen Haupttragelementen
- geringer Materialeinsatz in der Dachfläche
- Beeinflussung des Tragverhaltens durch Zusatzmaßnahmen nur bei destabilisierenden Einwirkungen
- charakteristische Konstruktionen zur Aufnahme der horizontalen Auflagerkräfte

Erfüllt eine Dachkonstruktion alle genannten Kriterien, so ist die Zuordnung zu den Hängedächern gegeben. Artverwandte Konstruktionen weichen in mindestens einer Eigenschaft ab und können damit abgegrenzt werden.

Dachflächen mit konkaver Form können zudem mit zahlreichen weiteren Tragwerkstypen gebildet werden, dazu gehören z. B. Fachwerkträger mit gebogenen Gurten oder gekrümmte Vollwand-Biegeträger. Diese Konstruktionen weisen bis auf die Dachform keine maßgebenden Übereinstimmungen mit hängenden Dächern auf und werden daher nicht zu den artverwandten Konstruktionen gezählt.

Die nachfolgend angestellten Untersuchungen legen den Fokus auf Hängedächer und beleuchten die aus den charakteristischen Merkmalen resultierenden Besonderheiten.

3 Entwicklung der Hängedächer

3.1 Von der Hängebrücke zum hängenden Dach

Das Hängedach entwickelte sich technisch auf Grundlage des Ingenieurbaus, von den Hängebrücken über abgehängte Dächer bis hin zu Hängedächern und verwandten Bauformen. Die Entwicklung des Hängedachs ist eng verknüpft mit dem Stand der Technik zugbeanspruchter Konstruktionen, der wesentlich durch die Anforderungen beim Bau weitgespannter Hängebrücken vorangetrieben wurde. Ausgehend von Brücken aus Naturseilen entstanden schon sehr früh (spätestens im 6. Jahrhundert) in China erste eiserne Ketten-Hängebrücken, die meistens ohne Versteifungsträger ausgeführt wurden. Die Hängebrückenbauweise verbreitete sich in der Folge weltweit.

Das Prinzip der Hängebrückenbauweise wurde auf Dächer übertragen, wobei zunächst konventionelle Dachkonstruktionen an Seiltragwerke gehängt wurden. Neben der Möglichkeit, große Spannweiten zu überwinden, entwickelten sich damit auch neue Konstruktionsformen.

Die ersten Hängedächer wurden bereits ab 1824 von dem tschechischen Ingenieur Friedrich Schnirch entworfen und umgesetzt. 1826 ließ er sich diese neue Dachkonstruktion patentieren [Graefe 1990-2]. Im Gegensatz zu abgehängten Dächern ersetzten kettenartige Eisenglieder bzw. Augenstäbe auch die Sparren und Firstpfetten. Das Tragwerk bestand aus parallelen Tragketten, auf denen die Eindeckung befestigt wurde. Auf biegesteife Bauteile wurde im Dachstuhl – mit Ausnahme der druckbeanspruchten Stiele – gänzlich verzichtet. Dokumentiert ist der Entwurf für ein Theaterdach in Eisenkettenbauweise aus dem Jahr 1824 (Bild 3-1).

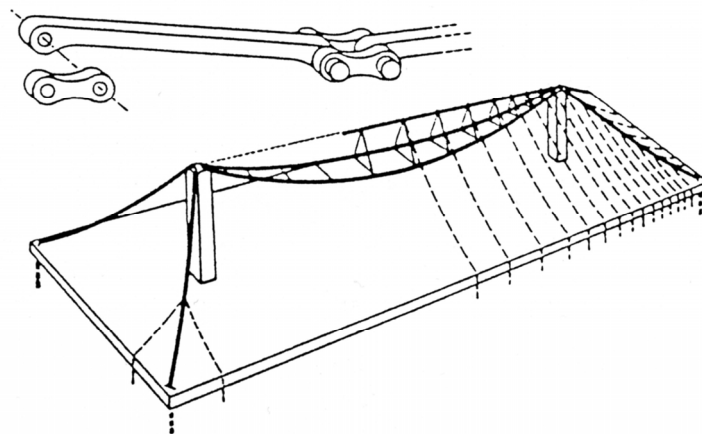


Bild 3-1 Entwurf eines Theaters mit Hängedach aus Eisenketten, 1824, Ingenieur: Friedrich Schnirch [Graefe 1989]

Schnirch versprach sich von dieser Bauweise leichte Konstruktionen, geringere Kosten und vor allem ein im Vergleich zu Holzdächern besseres Verhalten im Brandfall. Von sechs auf dem Gebiet der ehemaligen Tschechoslowakei ausgeführten Häusern mit Hängedach sind zwei in der

Fachliteratur [Ferjenčík 1975] näher beschrieben. Eines dieser Häuser aus dem Jahr 1826 steht in Banská Bystrica (Neusohl, Slowakei) und ist bis heute erhalten (Bild 3-2 und Bild 3-3).



Bild 3-2 Wohnhaus mit Hängedach in Banská Bystrica (Neusohl), Ingenieur: Schnirch (BNr. 68) [Ferjenčík 1992]

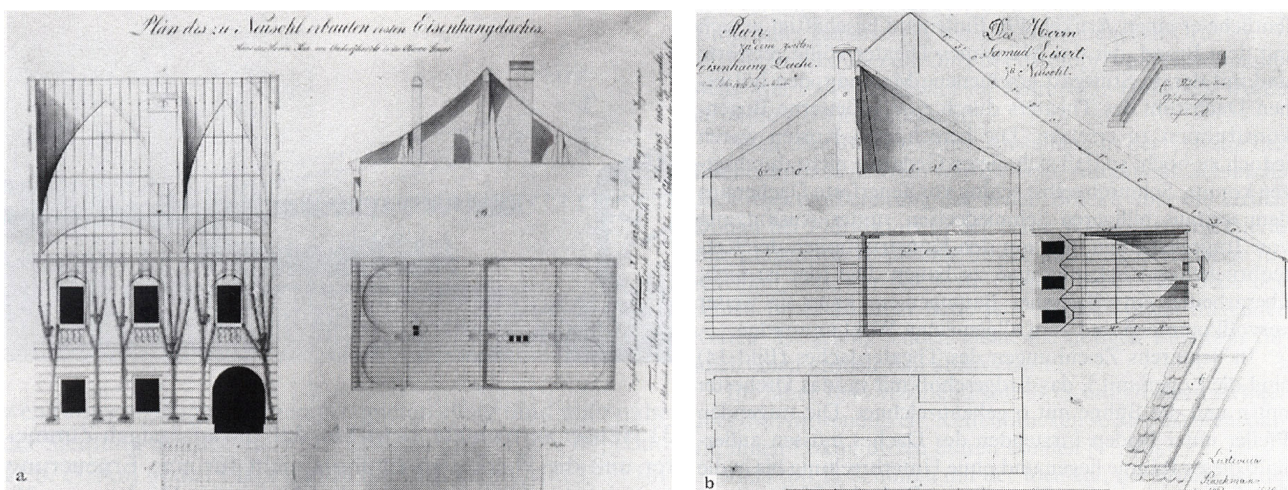


Bild 3-3 Konstruktionszeichnungen [Ferjenčík 1992]
a) des Wohnhauses mit Hängedach in Banská Bystrica (Neusohl) (BNr. 68)
b) eines weiteren Wohnhauses in Banská Bystrica

Anfang des 19. Jahrhunderts wurden in Frankreich die ersten Drahtseilbrücken entwickelt. Maßgebende Pioniere waren die Ingenieure Marc Seguin und Guillaume-Henri Dufour, die ab 1821 Hängebrücken mit Paralleldrahtbündelseilen an Stelle der einfachen Rundeisen bauten (Bild 3-4).

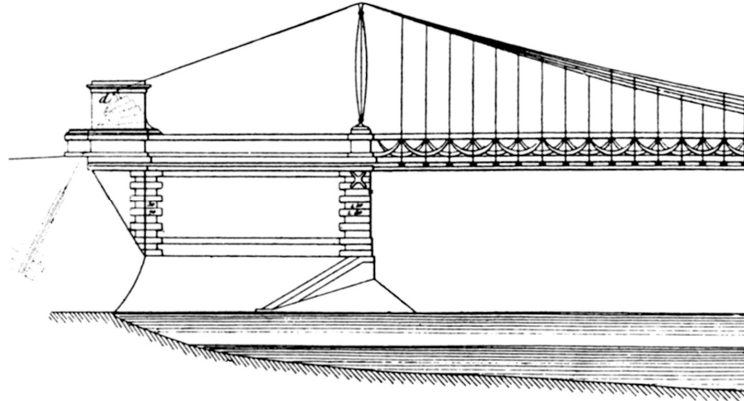


Bild 3-4 Drahtseilbrücke bei Bry-sur-Marne, 1832, Ingenieur: Marc Seguin [Mislin 1985]

Einen entscheidenden Entwicklungsschritt für zugbeanspruchte Konstruktionen stellte die Erfindung des Drahtseils durch den Oberberggrat Julius Albert 1834 in Clausthal dar. Das aus vielen Einzeldrähten bestehende Drahtseil ist gegenüber Ketten wesentlich tragfähiger und dauerhafter. Ab 1841 entwickelte der nach Amerika ausgewanderte Johann August Roebling in Saxonburg (USA) das Drahtseil weiter und wendete es erstmalig im Großbrückenbau bei der Brooklyn Bridge (Bauzeit 1869-1883) erfolgreich an.

In der Mitte des 19. Jahrhunderts konnte die Produktion von Stahl stark gesteigert werden. Gründe dafür lagen in einer Kombination aus der Erfindung der Dampfmaschine, der industriellen Erzeugung von Koks und der Entwicklung des Eisenbahnwesens. Die bisher verwendeten Ketten und Augenstäbe aus Schmiede- und Gusseisen wurden zunehmend durch Drahtseile und Profilstäbe aus Stahl verdrängt.

Dachkonstruktionen größerer Gebäude orientierten sich weiterhin an der aus dem Brückenbau bekannten und bewährten Bauweise. Ein Beispiel für eine frühe abgehängte Dachkonstruktion stellt die 1836/37 im Seehafen von Lorient erbaute Fertigungshalle dar (Bild 3-5), bei der sattelförmige Gitterbinder an zwei Abspannseilen zwischen zwei massive Lagerhallen als Widerlager gehängt wurden.

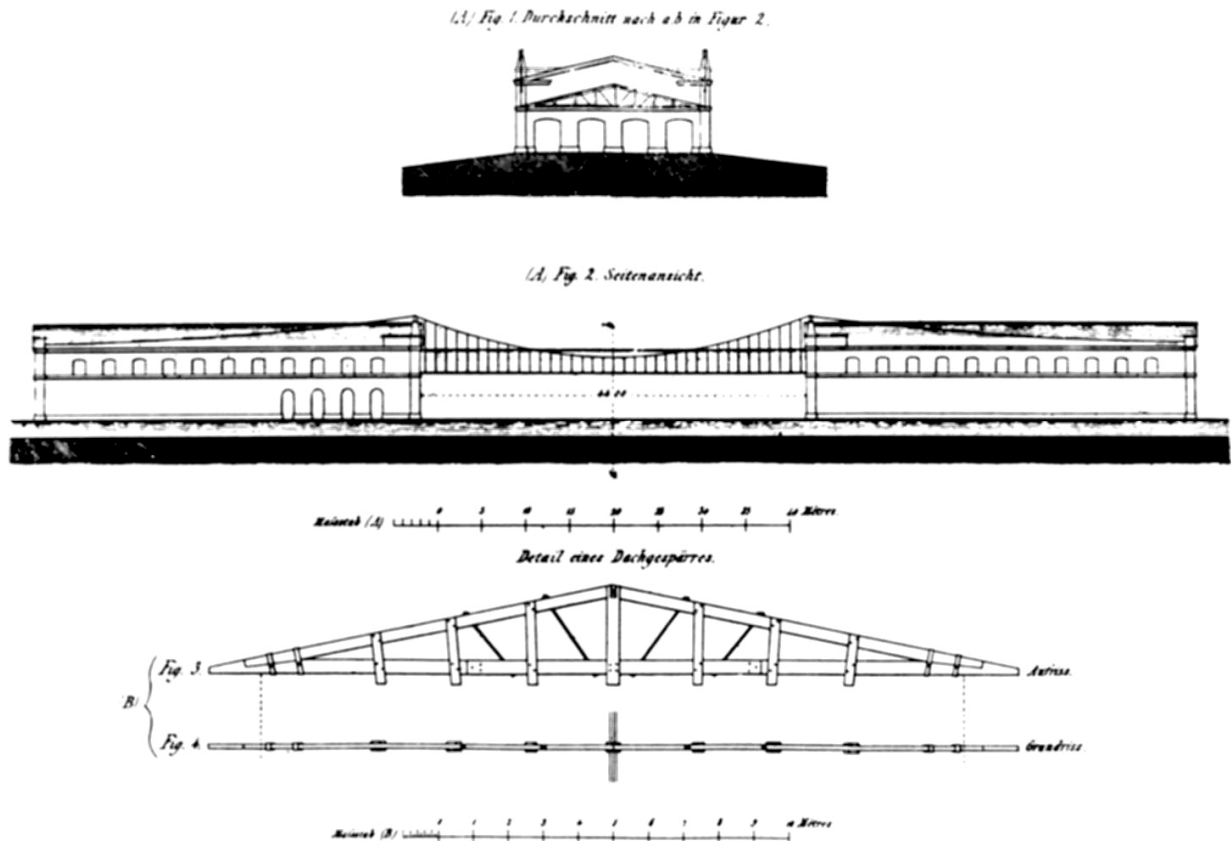


Bild 3-5 Fertigungshalle im Seehafen von Lorient, Ingenieur: Laurent (BNr. 47) [Mislin 1985]
 oben: Querschnitt
 mittig: Längsschnitt
 unten: Dachbinder (Querschnitt und Aufsicht)

In Frankreich herrschte in der Zeit von 1830 bis 1850 eine starke Begeisterung für Seilbrücken, die zu zahlreichen Neubauten dieser Konstruktionsart führte. Es kam jedoch in der Folge zu einer Reihe von Hängebrückeneinstürzen, wie z. B. dem der Brücke von Angers (1850), bei der viele Todesopfer zu beklagen waren. Die Einstürze wurden durch eine Verkettung verschiedener Umstände verursacht. Ein wesentlicher Aspekt dabei war, dass viele Brücken nicht ausreichend ausgesteift waren. Daher traten häufig Schwingungsprobleme auf, die zudem auf eine unzureichende konstruktive Beachtung der Bauwerksdynamik bei gleichzeitiger Unterschätzung der Lastannahmen für Brückenbauwerke zurückzuführen waren. Zusätzlich kam es infolge des mangelnden Korrosionsschutzes der Eisenbauteile bereits kurze Zeit nach Fertigstellung zu korrosionsbedingten Tragwerksschwächungen. Diese Ereignisse hemmten in der Folge die Weiterentwicklung im Entwurf und Bau von Hängebrücken und Hängedächern.

3.2 Konstruktive Weiterentwicklungen zur Versteifung hängender Dächer

Mitte des 19. Jahrhunderts konnten Parameter wie Durchbiegungen und Schwingungen an Brückenbauwerken noch nicht rechnerisch vorherbestimmt bzw. Zusammenhänge zu ungleichmäßigen Verkehrslasten oder Windangriff hergestellt werden. Daher wurden experimentell Möglichkeiten der Versteifung, wie den Einbau von Abspannungen, räumliche Verspannung der Tragseile, Erhö-

hung des Eigengewichts oder der Fahrbahnsteifigkeit, untersucht und an ausgeführten Brücken und anderen Seiltragwerken angewendet.

Bei dem abgehängten Dach der Rotunde des Panoramas auf den Champs Élysées in Paris (siehe Bild 3-6), das 1838/39 von dem Kölner Architekten und Bauforscher Jakob Ignaz Hittorf erbaut wurde, besteht das Tragwerk aus einem Hängewerk, das mit Drahtseilen unterspannt ist und somit einen Durchmesser von 40 m stützenfrei überdacht. Die Seile werden seitlich über gusseiserne Stiele geführt und in den Außenmauerwerkswänden verankert (Bild 3-7) [Mislin 1985]. Die Art der Seilführung und -befestigung wurde in Anlehnung an die Ausbildung der Brücke von Bry-sur-Marne von Seguin (vgl. Bild 3-4) gewählt.

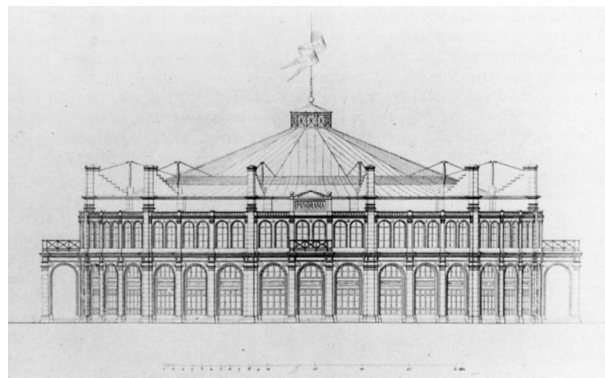


Bild 3-6 Rotunde des Panorama auf den Champs Élysées in Paris, Architekt: Hittorf (BNr. 49) [Mislin 1985]

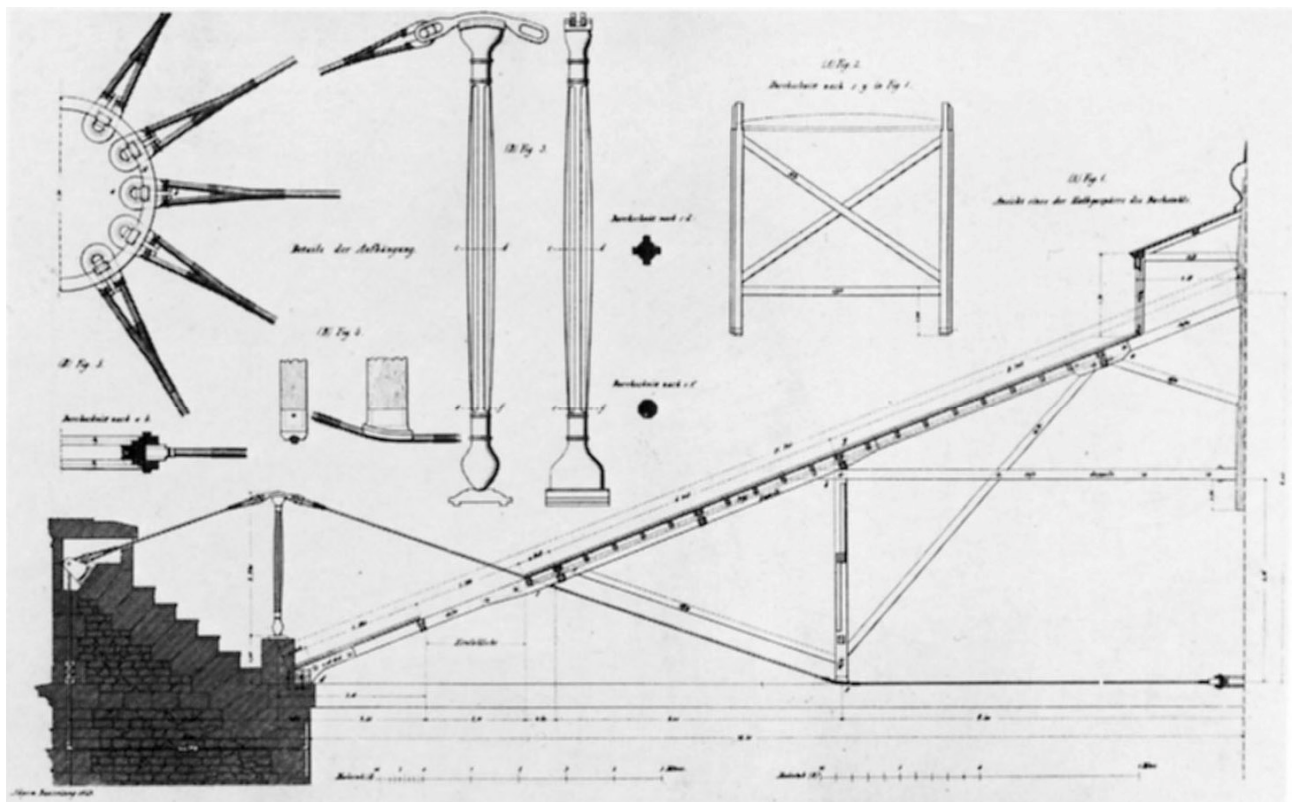


Bild 3-7 Konstruktionsblatt mit Darstellung des Hängewerks des Panorama (BNr. 49) [Mislin 1985]

1865 wurde die Sängerkhalle in Dresden (Bild 3-8) als temporärer Bau mit einem abgehängten Dach aus Gitterbindern, die durch Drahtseile verspannt waren, nach Entwürfen von Eduard Müller und Ernst Giese errichtet. Die Binder überspannten die Hallenbreite von 48 m. Die Tragseile wurden über zwei 35 m hohe Stützen geführt und unter einer Neigung von 45° im Baugrund verankert. Zur Erhöhung der Gesamtsteifigkeit und als Sicherung der Dachfläche gegen Abheben wurden die Tragseile mit Gegenseilen verspannt (siehe Bild 3-9) [Mislin 1985].

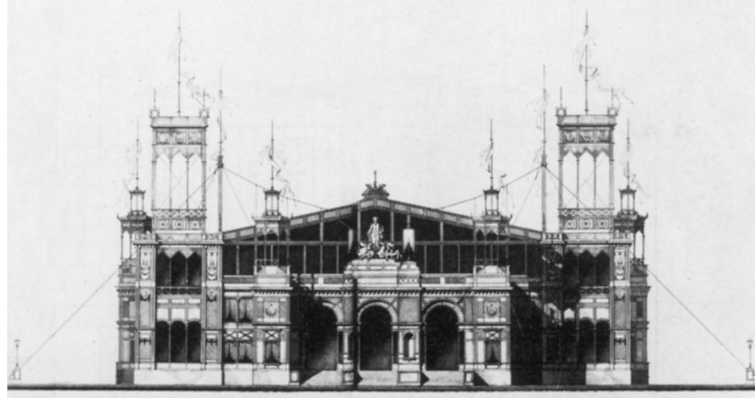


Bild 3-8 Halle des Sängerbundfestes in Dresden, Architekten: Müller, Giese, Ingenieur: Weisbach (BNr. 23) [Mislin 1985]

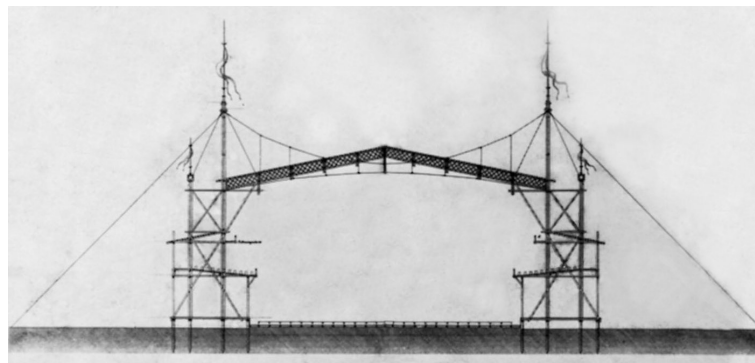


Bild 3-9 Tragkonstruktion der Halle des Sängerbundfestes in Dresden (BNr. 23) [Mislin 1985]

Ab 1866 entwickelten die französischen Ingenieure Lehaitre und Mondésir verschiedene Entwürfe für Hallen großer Spannweiten (Bild 3-10) [Graefe 1989]. Sie konstruierten hängende Dächer für einen Zirkus mit einem Durchmesser von 100 m mit oder ohne zentralen Mast, bei denen die Dachfläche auf den radialen Seilen aufgeständert oder auch von ihnen abgehängt war. Die Hängeseile wurden in umlaufenden äußeren Galeriegebäuden verankert. In Entwürfen für rechtwinklige Hallen von 75 m Breite überschnitten sich zur Reduzierung der Bauhöhe und Stabilisierung der Konstruktion gegensinnig gekrümmte Trag- und Spannseile. Im Überschneidungsbereich wurden Druckstäbe angeordnet, die die Dachfläche trugen. Bei den Entwürfen wurden konstruktive Elemente verwendet, die zu einer Weiterentwicklung der Systeme hängender Dächer beitrugen. Die mit Spannseilen, Spreizen und Hängern entworfenen „Seil- und Spreizbinder“-Systeme werden auch heute noch in vergleichbarer Bauweise genutzt (siehe Kapitel 2.2.2).

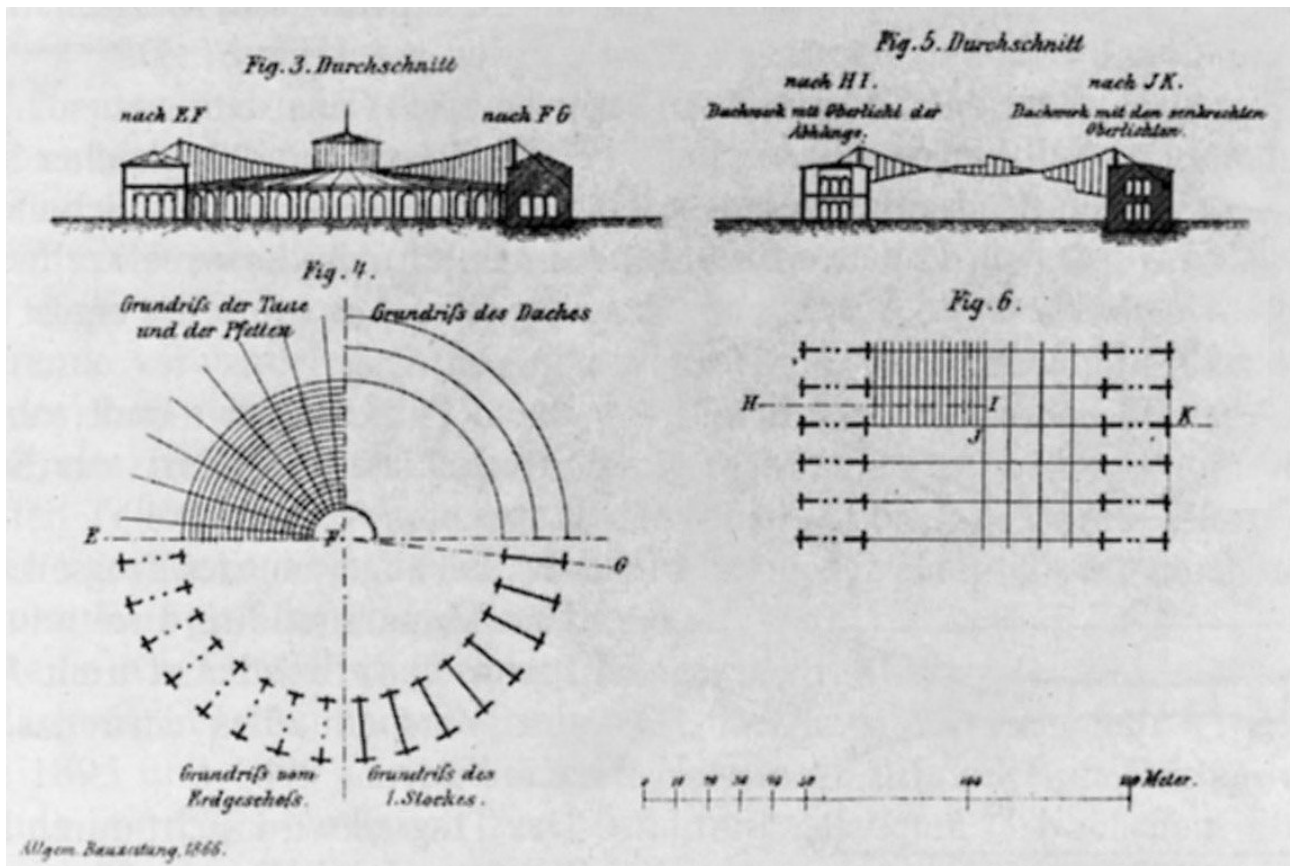


Bild 3-10 Entwürfe von Lehaitre und Mondésir für hängende Dächer [Mislin 1985]

links: über kreisförmigem Grundriss

rechts: über rechteckigem Grundriss

1917 wurde eine Flugzeughalle in Cherbourg (Frankreich) mit rechteckigem Grundriss nach dem System der Hängebrücken mit „starrer Fahrbahn“ mit angehängten eisernen Sparrendächern errichtet [Mislin 1985]. Konstruktionshistorisch neu war hierbei die Anordnung von doppelten Seilen („cable suspension truss“, siehe Bild 3-11), die durch Druckpfosten unter Spannung gehalten wurden. Zudem wurde erstmals ein räumliches Gitterfachwerk sowohl für die Decken- als auch für die Pylonenkonstruktionen genutzt.

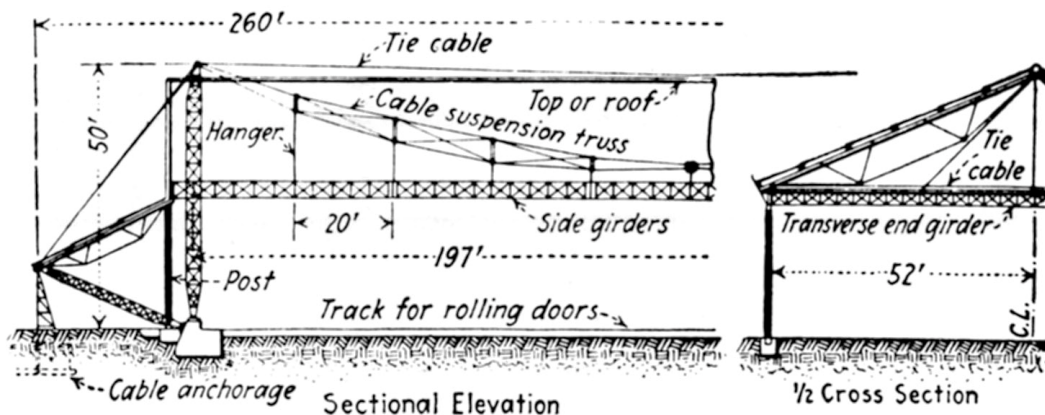


Bild 3-11 Flugzeughalle in Cherbourg (BNr. 42) [Mislin 1985]

Nach dem gleichen Prinzip entstand 1917 die Konstruktion des abgehängten Daches eines Hangars im Hafen von Bizerta (Tunis). Statt eines Sparrendachs wurden jedoch Sheddächer verwendet. Die Ausfachungselemente der verschiebbaren Außenwände wurden als räumliche Fachwerke ausgebildet (Bild 3-12) [Mislin 1985].

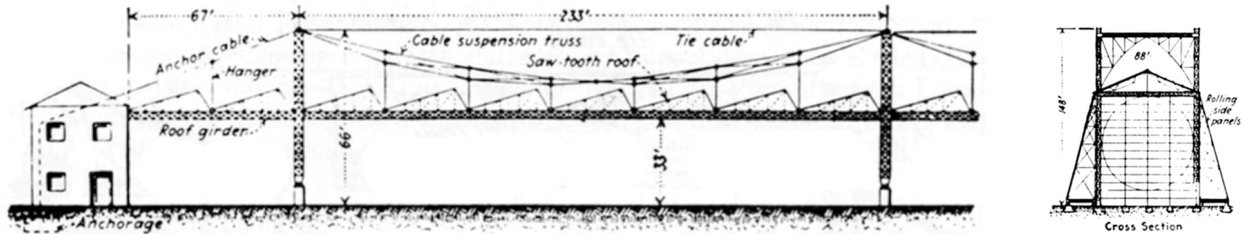


Bild 3-12 Hangar im Hafen von Bizerta, Ingenieure: Cazenave, Minard (BNr. 90) [Mislin 1985]
Seitenansicht und Querschnitt

3.3 Hängedächer mit netzförmigen und flächigen Zugelementen

In Russland entwickelte Wladimir G. Schuchow Hängedächer, die als Flächentragwerke ausgebildet wurden. Seine Entwürfe sahen vor, Netze aus Band- und Winkeleisen zu verwenden. 1895 meldete er ein Patent auf die Erfindung eines „netzförmigen Systems“ zur Überdachung von Gebäuden an. Anstelle der üblichen, aus unterschiedlichen Teilen zusammengefügtten Fachwerkkonstruktionen sollten dabei flächige Tragwerke aus identischen Einzelteilen hergestellt werden. Die Dachkonstruktion bestand aus diagonal sich kreuzenden, nicht biegesteifen, linearen Elementen. An den Kreuzungsstellen wurden die Elemente vernietet oder verschraubt und bildeten so Netze mit rautenförmigen Maschen. Die Netze wurden anschließend mit Eisenblech bedeckt. Diese Flächentragwerke sollten ebenso als hängende, zugbeanspruchte wie als gewölbte, druckbeanspruchte Variante ausführbar sein. In beiden Fällen konnten Flächen mit einfacher und mit doppelter Krümmung ausgebildet werden. Bei der Ausstellung von Nischni Novgorod 1896 wurden vier Ausstellungspavillons mit hängenden Netzdächern errichtet. Ein Dach entstand über einem kreisrunden Grundriss und wies eine doppelt gekrümmte Fläche auf (Bild 3-13 und Bild 3-14).

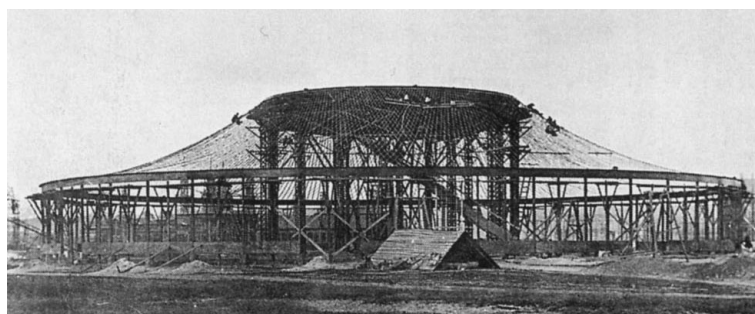


Bild 3-13 Bau der Rotunde, Ingenieur: Schuchow (BNr. 92) [Graefe 1990-2]

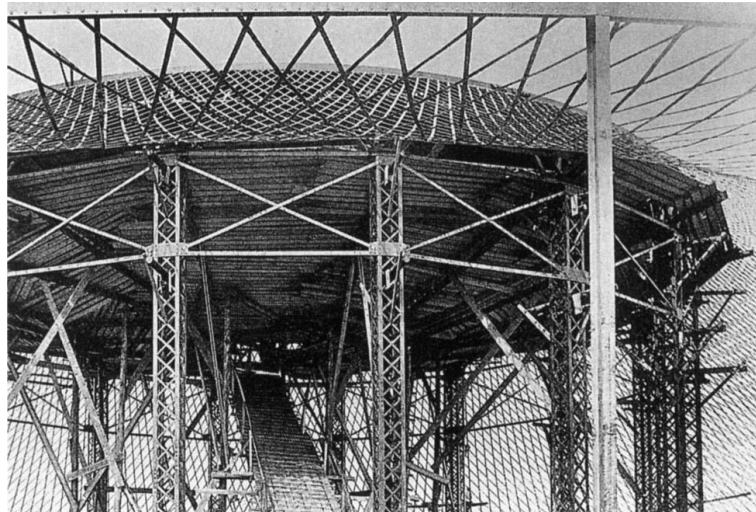


Bild 3-14 Dachkonstruktion der Rotunde im Bauzustand; innerer Ringträger auf Stützen (BNr. 92) [Graefe 1990-2]

Zwei weitere Hängedächer überspannten rechteckige Grundrisse und bildeten einfach gekrümmte Netzflächen (Bild 3-15 und Bild 3-16).

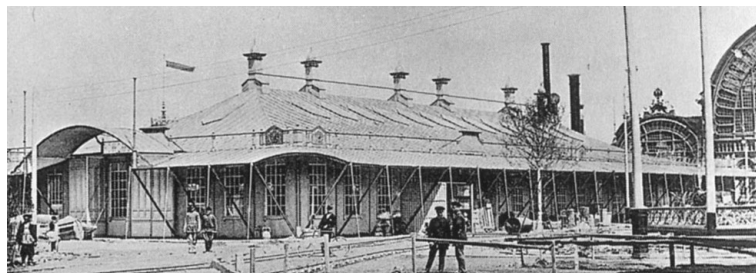


Bild 3-15 Rechteckiger Ausstellungspavillon, Außenansicht, Ingenieur: Schuchow (BNr. 93) [Graefe 1990-2]

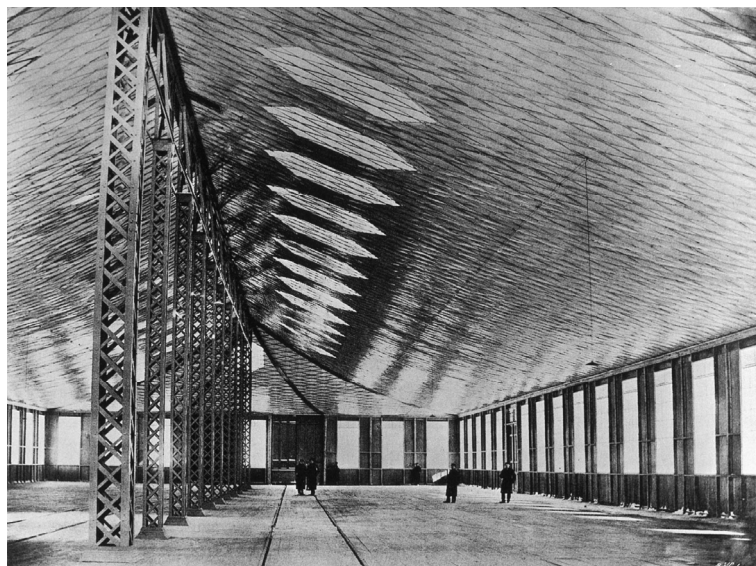


Bild 3-16 Rechteckiger Ausstellungspavillon, Innenraum; Firstgitterträger auf Stützenreihe (BNr. 93) [Graefe 1990-2]

Das vierte Dach hatte einen ovalen Grundriss, es bildete sich eine Kombination von rechteckigen und halbkreisförmigen Grundrissflächen mit entsprechend gekrümmten Dachflächen (Bild 3-17 und Bild 3-18).

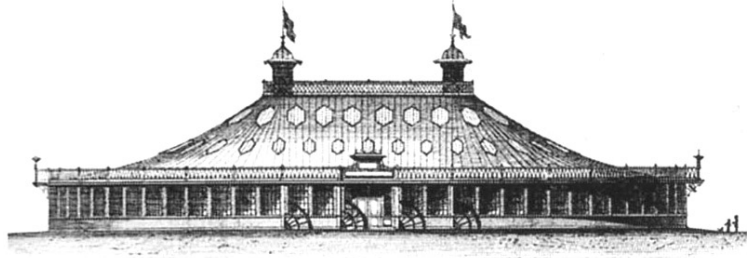


Bild 3-17 Ovaler Ausstellungspavillon, Längsansicht, Ingenieur: Schuchow (BNr. 94) [Graefe 1990-2]

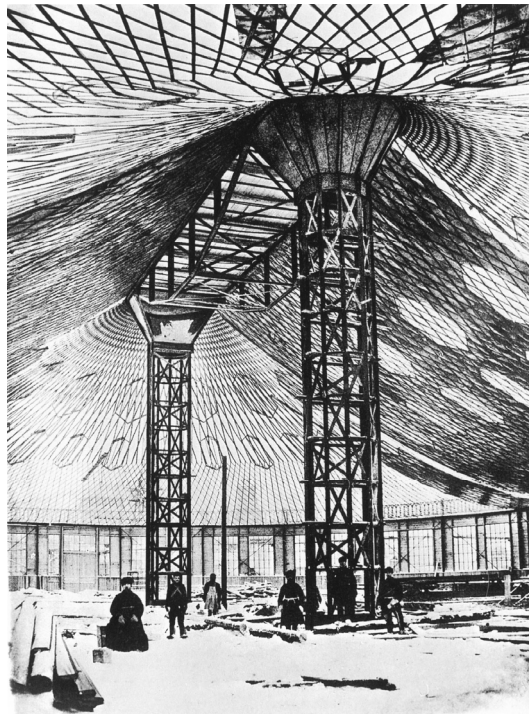


Bild 3-18 Ovaler Ausstellungspavillon, Innenraum während des Eindeckens des Daches, unterspannter Fachwerk-Firstbalken auf zwei Gitterstützen (BNr. 94)[Graefe 1990-2]

Die Vorteile der Bauweise mit Flacheisennetzen waren das geringe Gewicht der Konstruktion, die reine Zugbeanspruchung der Netzelemente, die große Tragfähigkeit und die wesentliche Vereinfachung von Herstellung und Montage durch die Gleichheit aller Konstruktionselemente [Graefe 1990-1].

An einer Getreidelagerhalle der Firma Cargill in Albany im US-Bundesstaat New York wurde 1933 ein bis heute erhaltenes Hängedach errichtet, bei dem eine dünne, nicht vorgespannte Blechmembran frei zwischen massiven Wandscheiben hängt. Die insgesamt vier Dachflächen spannen über jeweils 36,60 m bei einer Breite von 82,50 m und sind an ihren Längsseiten durch hoch aufragende Stahlbetonsilos eingefasst (Bild 3-19).



Bild 3-19 Getreidelagerhalle Albany, Ansicht einer der vier Dachflächen, Architekt: James Stewart (BNr. 73) [Otto 1954]

Die nur 2,7 mm dünnen Bleche wurden in Bahnen zu 1,22 m Breite und 9,15 m Länge angeliefert, am Boden miteinander verschweißt, mittels einer Winde in Position gezogen und an Ankerbolzen befestigt. Nach dem Einjustieren wurden sie unter Berücksichtigung besonderer Dehnungsfugen zu einer durchgehenden Dachfläche verschweißt [Otto 1954].

Nach Auskunft von Herrn Bruce Bruemmer (Firma Cargill) sind neben der Getreidelagerhalle in Albany weitere baugleiche Konstruktionen in Omaha (1930), Chicago (1933), Memphis (1936), East St. Louis (1940) und Wilson (North Carolina) (1940) errichtet worden, über deren Erhaltung keine Informationen vorliegen [Bruemmer 2009].

1937 verwendeten der Architekt Robert Camelot und der Ingenieur Bernard Laffaille für das Dach des Französischen Pavillons auf der Messe von Zagreb (Bild 3-20) ebenfalls eine Blechmembran. Da der äußere Druckring kreisrund ist und das Dach im Zentrum durch eine schwere verglaste Laterne gespannt wird, stellte sich als Dachform ein umgekehrter Kegelstumpf ein (Bild 3-21).



Bild 3-20 Französischer Pavillon Zagreb, Architekt: Camelot, Ingenieure: Herbé, Laffaille (BNr. 62) [Picon 1997]

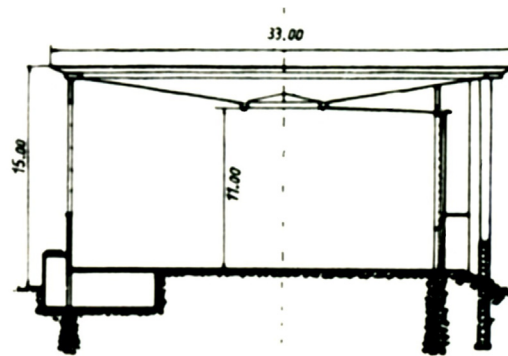


Bild 3-21 Querschnitt durch den Französischen Pavillon Zagreb (BNr. 62) [Otto 1954]

3.4 Anwendung der Verspannung und Vorspannung

Erst nach 1945 wurde die Bedeutung des Stahlseils für die Zugkraftabtragung bei Hängekonstruktionen erneut erkannt. Anfang der 50-er Jahre entwickelte der schwedische Ingenieur David Jawerth ein Dachbindersystem, bei dem durch Vorspannung gegensinnig gekrümmter, miteinander verbundener Seile eine wesentliche Reduzierung der Verformungen der Dachkonstruktion erreicht werden konnte. Ein verbessertes Tragverhalten stellt sich, insbesondere bei einseitiger Belastung ein, wenn die Horizontalverschiebung des Tragseiles in seiner Ebene durch die Anordnung von diagonalen Verbindungselementen verhindert wird [Rickensdorf 1982]. Dieses Konstruktionssystem stellt eine Weiterentwicklung der von den Hängebrücken und Dächern des 19. Jahrhunderts bekannten Versteifungsmaßnahmen dar. Ein Beispiel für die Verwendung dieser „Jawerth-Träger“ ist das Eisstadion Hovet in Stockholm-Johanneshov von 1955 (siehe Bild 3-22 und Bild 3-23).

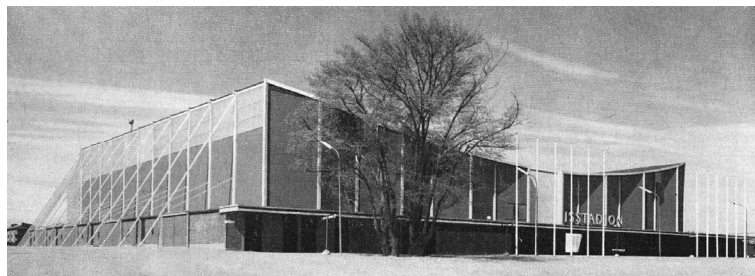


Bild 3-22 Eisstadion Hovet, Architekt: Hedqvist, Ingenieur: Jawerth (BNr. 71) [Jawerth 1966-2]

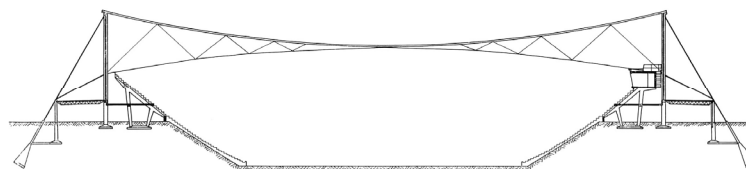


Bild 3-23 Querschnitt durch die Konstruktion des Eisstadions Hovet mit Jawerth-Träger (BNr. 71) [Jawerth 1966-2]

Zur Versteifung der Dachfläche wurde neben der Verspannung der Tragseile auch die Nutzung zweiachsig spannender Tragsysteme entdeckt. Die Schwarzwaldhalle, 1953 von dem Architekten Schelling und den Ingenieuren Finsterwalder und Dischinger in Karlsruhe errichtet, besitzt eines der

ersten gegenläufig gekrümmten Dächer in Deutschland (Bild 3-24 bis Bild 3-26). Über einem annähernd elliptischen Grundriss liegt der geschlossene, der Dachform entsprechend gekrümmte Randträger des nur 6 cm dicken Spannbetondachs auf 36 umlaufenden Stützen auf.

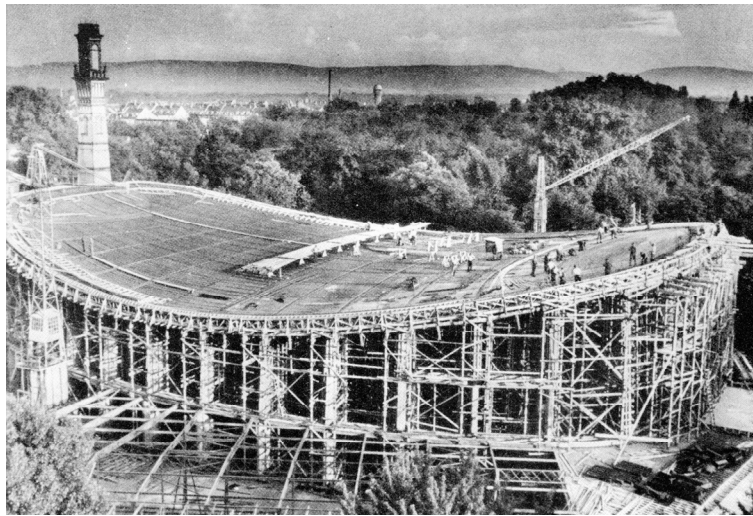


Bild 3-24 Schwarzwaldhalle Karlsruhe (im Bauzustand), Architekt: Schelling, Ingenieure: Finsterwalder, Dischinger (BNr. 30) [Otto 1954]

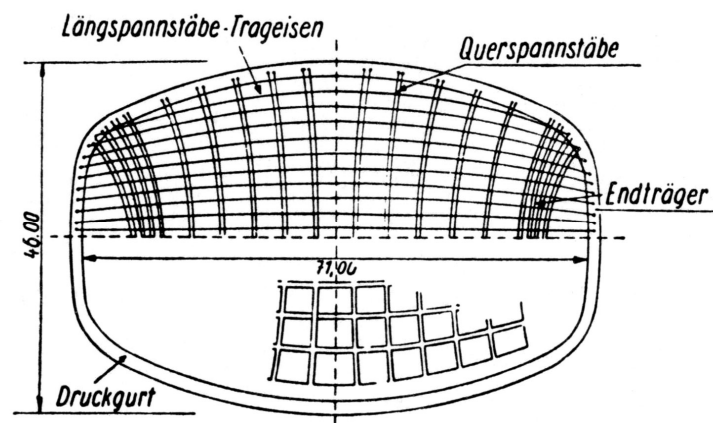


Bild 3-25 Schwarzwaldhalle Karlsruhe, Schematische Darstellung der Dachkonstruktion (oben) und Deckenuntersicht (unten) (BNr. 30) [Otto 1954]

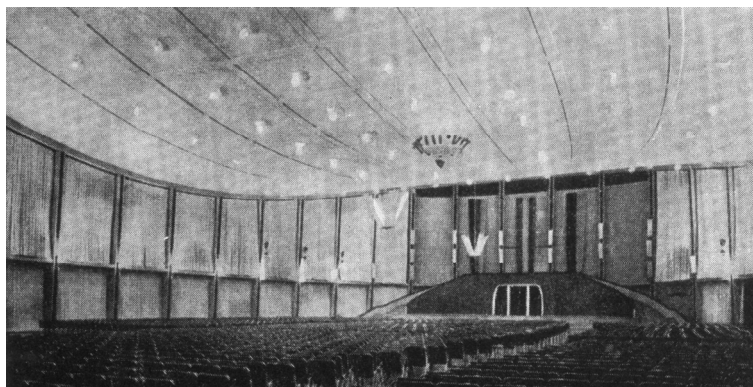


Bild 3-26 Schwarzwaldhalle Karlsruhe, Innenraum (BNr. 30) [Addis 2007]

Bei der 1957 erbauten Schwimmoper in Wuppertal (Bild 3-27) spannen die Tragseile einachsig über die größere Hallenseite. Stabilisiert wird das Dach zum einen durch sein hohes Eigengewicht, zum anderen durch das Vorspannen des Ortbetonquerschnitts, wodurch sich eine Zylinderschalenwirkung mit einer Quertragfähigkeit einstellt [Hetzelt 1957]. Die Zuschauertribünen wurden in die lastabtragenden Binder an den Stirnseiten integriert (Bild 3-28).

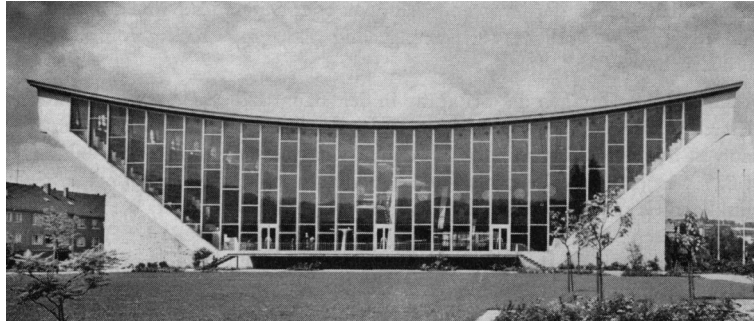


Bild 3-27 Schwimmoper Wuppertal, Außenansicht, Architekt: Hetzelt, Ingenieur: Leonhard (BNr. 20) [Rabinovič 1966]

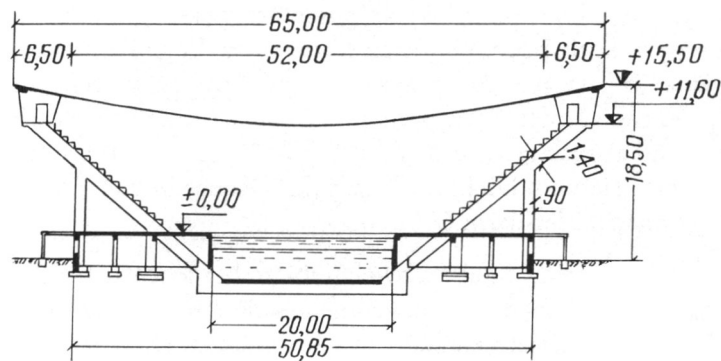


Bild 3-28 Längsschnitt durch die Schwimmoper Wuppertal mit Zuschauertribünen (BNr. 20) [Rabinovič 1966]

3.5 Entwicklung gestalterischer Vielfalt

Mit zunehmendem Kenntnisstand zum Tragverhalten und zur Ausführung von Hängedächern wurden ab Mitte des 20. Jahrhunderts auch komplexere und gestalterisch vielfältigere Dachentwürfe realisierbar. Für die 1955 erbaute Kirche St. Paulus in Velbert sah der Architekt Gottfried Böhm ein Bimsbeton-Hängedach für das Hauptschiff vor, das von einem Querschiff in Form einer Stahlbeton-tonne überschnitten wird (Bild 3-29). Im Durchdringungspunkt über dem Altar fehlt die Beton-ausfächung des Hängedachs. Die Tragseile liegen in diesem Bereich frei und lassen Licht durch die verglasten Seitenwände des Querschiffs in den Innenraum scheinen (Bild 3-30).

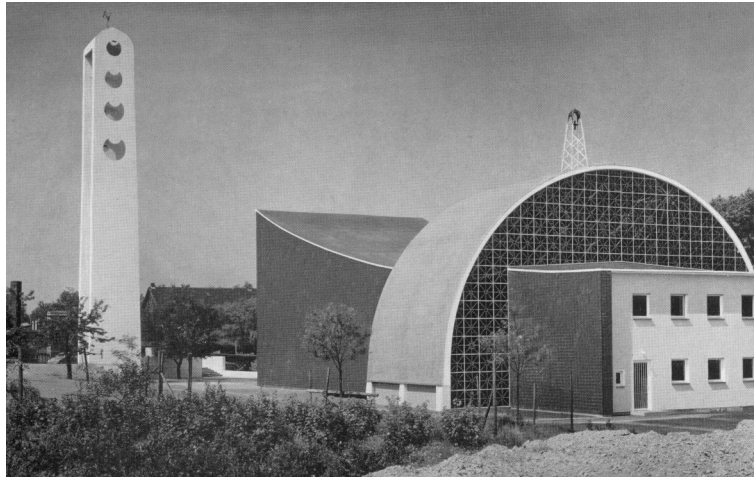


Bild 3-29 St. Paulus Kirche Velbert, Architekt: Böhm, Ingenieur: Wolf (BNr. 19) [Weyres 1957]



Bild 3-30 Blick in den Altarraum der St. Paulus Kirche Velbert (BNr. 19) mit fehlender Dachausfachung [Weyres 1957]

Der anlässlich der Weltausstellung Expo 98 nach Plänen des Architekten Álvaro Siza Vieira errichtete portugiesische Pavillon besteht aus zwei massiven Gebäudeteilen (Bild 3-31). Der weite Platz dazwischen wird von einem 67 m frei hängenden Stahlbetondach überspannt. Die nicht rostenden Spannseile liegen auf den jeweils letzten Metern frei und sind durch Hüllrohre vom Stahlbeton getrennt, um Zwängungen zu vermeiden (Bild 3-32) [Drew 2008].



Bild 3-31 Portugiesischer Pavillon, Architekt: Siza Vieira, Ingenieur: Arup (BNr. 55) [Drew 2008]



Bild 3-32 Portugiesischer Pavillon, Auflagerrand mit frei liegenden Spannseilen (BNr. 55) [Sandaker 2008]

Das Fußballstadion in Braga (Portugal) von 2003 nach einem Entwurf des Architekten Eduardo Souto de Moura weist neben der ungewöhnlichen Anordnung der Zuschauerränge ausschließlich entlang der Spielfeldlängsseiten auch eine besondere Tribünenüberdachung auf. Zwischen den Häuptern der massiven Tribünenbauwerke spannen die Stahlseile eines Hängedachs über 200 m, wobei nur im Bereich der Ränge eine Eindeckung aus Stahlbetonfertigteilen angeordnet wurde. Im mittleren Teil liegen die Seile frei (Bild 3-33).



Bild 3-33 Fußballstadion Braga, Architekt: Souto de Moura (BNr. 54) [Drew 2008]

3.6 Nutzung von Hängedächern in bauphysikalischen Gebäudekonzepten

Ab Mitte der 1980-er Jahre wurden bei Gebäudeentwürfen verstärkt die gebäudeklimatischen Eigenschaften betrachtet. Dabei entwickelte sich ein Trend hin zur Nutzung natürlicher bauphysikalischer Effekte statt künstlicher Steuerung. Hängedächer bieten aufgrund ihrer besonderen Dachform für diese Zwecke viele Vorteile (siehe auch Kapitel 8.2).

Bei einem Großraumbüro für die Firma Lowara setzte der Architekt Renzo Piano 1985 ein Hängedach mit sehr großem Durchhang ein, um das Tageslicht direkt oder über Reflexionsflächen an die Arbeitsplätze zu leiten und die Lärmimmissionen zu verringern [Angélil 1987]. Das Heiz- und Kühlsystem wird ergänzend zur natürlichen Be- und Entlüftung des Großraums durch im Boden angeordnete Gebäudetechnik gesteuert (Bild 3-34 und Bild 3-35).



Bild 3-34 Lowara Company Offices in Montecchio Maggiore, Architekt: Renzo Piano, Ingenieure: Favero & Milan (BNr. 61) [Pizzi 2003]

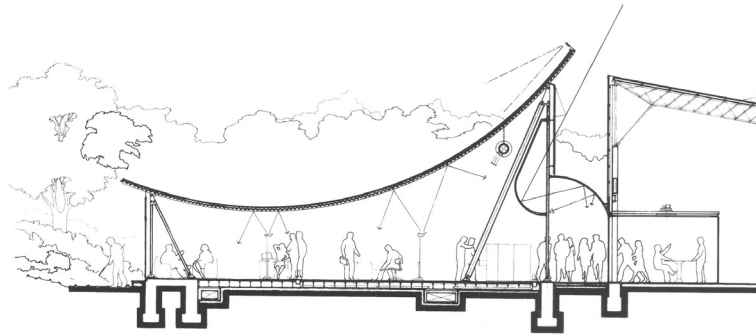


Bild 3-35 Querschnitt durch den Büroraum mit Belichtungskonzept (BNr. 61) [Pizzi 2003]

Die 26.000 m² große Messehalle 26 in Hannover (Bild 3-36) wurde in nur neun Monaten Bauzeit errichtet (Mai 1995 bis Februar 1996) [Bauen mit Holz 1997]. Bei ihrer Entwicklung strebte der Architekt Thomas Herzog ein Belichtungskonzept an, das die Nutzung von Tageslicht, unterstützt durch künstliche Beleuchtung, mit den jeweiligen Möglichkeiten der Lichtlenkung und -streuung vorsieht. Darüber hinaus wurde ein kombiniertes Verfahren für die Klimatisierung der dreischiffigen Halle entwickelt. Dabei wird auf eine natürliche Belüftung über Fassadenöffnungen, ergänzt durch Klimakanäle gesetzt. Die Entlüftung erfolgt durch Firstklappen unter Nutzung thermischen Auftriebs. Die Luftlenkung wird dabei durch die Form des Hängedachs mit seinen Hochpunkten begünstigt.

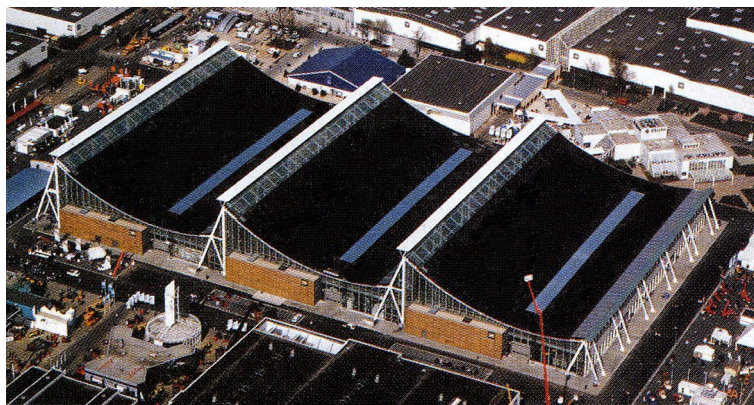


Bild 3-36 Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog; Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 10) [Bauzentrum 1999]

2007 wurden für die Neue Messe in Stuttgart eine große zweischiffige (Bild 3-37) sowie sieben einschiffige Hallen mit Hängedächern fertiggestellt. Ziel war auch hier, während der Auf- und Abbauphasen komplett ohne zusätzliche mechanische Lüftung auszukommen und während des Messebetriebs den Einsatz der mechanischen Lüftungsanlagen auf ein nötiges Minimum zu beschränken [Messe Stuttgart]. Die geschwungene Oberseite der Hängedächer wird zudem durch Grünstreifen in den Tiefpunkten und Solarkollektoren an den steilen Bereichen im Rahmen eines Nachhaltigkeitskonzeptes genutzt (Bild 3-38).



Bild 3-37 Neue Messe Stuttgart, große Halle 1 mit anschließender Halle 3, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35) [Wettbewerbe 2007]



Bild 3-38 Neue Messe Stuttgart, Dachaufsicht auf Halle 6 (BNr. 35) [Messe Stuttgart]

3.7 Materialbezogene Weiterentwicklungen

Aufgrund ihrer Eignung wurden für Hängedächer vorwiegend metallische Zugelemente in Kombination mit Eindeckungen aus Beton verwendet. Die Weiterentwicklung von Baustoffen, Produktionsabläufen und Montagetechniken ermöglicht heute eine vielfältige Materialauswahl für die Konstruktionen von Hängedächern.

Der Werkhof in Hohenems wurde 1999 mit annähernd 20 m langen Bahnen aus Furnierschichtholz überdacht. Die Holzwerkstoffbahnen spannen zwischen zwei Flügelbauten und dienen gleichzeitig als Zugelement und Dacheindeckung (Bild 3-39 und Bild 3-40).



Bild 3-39 Werkhof Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Merz 2001]



Bild 3-40 Werkhof Hohenems, Dachuntersicht (BNr. 60) [Merz 2001]

Das 1993 gebaute Bahnhofsvordach in Ulm (Bild 3-41) ist mit einer Eindeckung aus Verbund-sicherheitsglasplatten versehen, die auf Stahlzugbändern aufliegen.



Bild 3-41 Bahnhofsvordach Ulm, Architekten: Jauss + Gaupp, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 36) [Jauss]

Die aktuelle Entwicklung von Hängekonstruktionen ist vor allem durch neu entwickelte Materialien für Zugelemente geprägt. Großes Potential zeigen auch Zugelemente aus Kohlenstofffasern (siehe Kapitel 6.2.2), die bereits für Spannbandbrücken angewendet wurden [Schaich 2007]. Ein Einsatz bei Hängedächern ist - soweit bekannt - bisher jedoch noch nicht erfolgt.

4 Analyse der Formen von Hängedächern

4.1 Grundlagen

Die Form eines Hängedachs entsteht infolge der unbehinderten Verformung der Zugelemente unter dem Eigengewicht der Dachhaut sowie gegebenenfalls zusätzlich aufgebracht Lasten. Aufgrund des besonderen Lastabtrags von Hängedächern, der ausschließlich über Zugkräfte erfolgt, passt sich die Verformungsfigur stets der auftretenden Belastung an. Die Form der Hängedächer steht daher in enger Interaktion mit der Belastung bzw. dem Lastabtrag. Die Ausbildung der Zugelemente, insbesondere ihre Länge, sowie die Randbedingungen der Auflagerung weisen konstruktionsbedingt ebenfalls einen großen Einfluss auf die Dachform auf. Im Folgenden werden daher die Zusammenhänge und Parameter, die maßgeblich die Dachform von Hängedächern beeinflussen, näher untersucht. Hierzu werden in einem ersten Schritt Analysen zum Trag- und Verformungsverhalten eines Einzelseils durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgen Untersuchungen an Hängedachflächen, deren Ergebnisse in einem Formenkatalog zusammengefasst werden.

4.2 Trag- und Verformungsverhalten von Einzelseilen

Die Zugelemente von Hängedächern können statisch auf Einzelseile zurückgeführt werden. Das Seil ist ein Tragelement, das nur Zugkräfte aufnehmen kann. Es wirkt wie eine Kette unendlich vieler Biegeelenke.

Das nur an einem Ende gelagerte, vertikal hängende Seil ist ein eindimensionales Element. Die Anordnung zwischen nicht vertikal übereinander liegenden, festen Punkten führt infolge seines Eigengewichts zu einer Verformung aus seiner linearen Ausgangslage heraus. Das Tragsystem bestreicht dann eine Ebene und wird dadurch zweidimensional.

Die Spannweite L bezeichnet dabei den horizontalen Abstand der beiden Aufhängepunkte eines Seils. Unter dem Durchhang f versteht man den größten vertikalen Abstand zwischen der Verbindungslinie der Auflager, der sogenannten Sehne, und der verformten Seillage. Er ist bei gleichmäßiger Belastung in der Seilmitte am größten. Die Seillänge L_s ergibt sich in Abhängigkeit von der Spannweite und dem Durchhang (Bild 4-1).

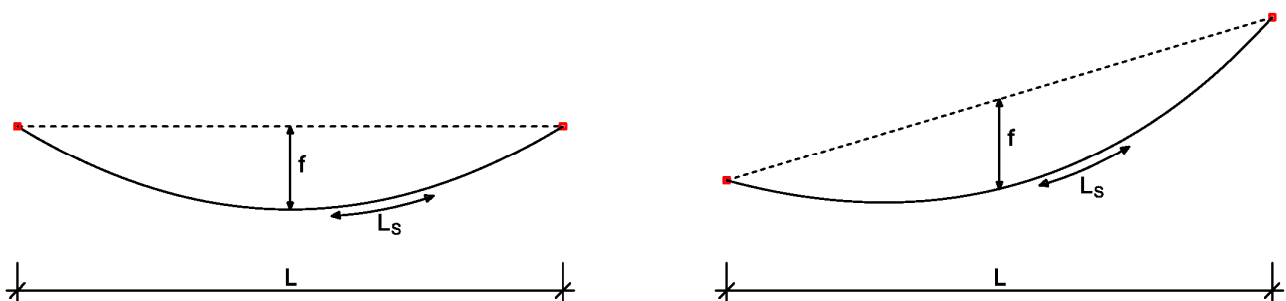


Bild 4-1 Durchhang f , Spannweite L und Seillänge L_s

Eine Eigenheit des Seils besteht darin, dass es infolge seiner idealen Biegeweichheit eine Form einnimmt, die sich der Belastung anpasst. Diese belastungsabhängige Form ist als „Seillinie“ definiert. Eine Einzellast erzeugt im Seil am Angriffspunkt der Last einen Knick, unter einer gleichmäßigen Streckenlast nimmt das Seil die Form einer Parabel an. Da das Eigengewicht des durchhängenden Seils nicht konstant über die Spannweite verteilt ist, sondern aufgrund der Seilneigung zu den Aufhängepunkten hin zunimmt, stellt sich unter der Eigenlast die so genannte „Kettenlinie“ ein. Die Kettenlinie ist die spezielle Form einer Seillinie unter Eigengewicht (siehe Bild 4-2).

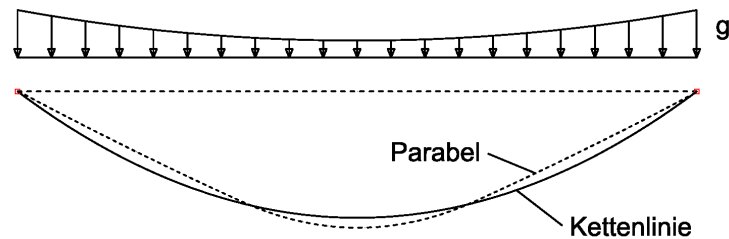


Bild 4-2 Verteilung des Eigengewichts eines Seils mit verformter Seilgeometrie (Seillinie = Kettenlinie); zum Vergleich: parabolische Seillinie infolge gleichmäßiger Linienlast

Die Kettenlinie weicht nur geringfügig von einer Parabelform ab, solange der Durchhang im Verhältnis zur Spannweite klein bleibt. Für genauere Betrachtungen der Verformungen, besonders bei Seilen mit größerem Durchhang, ist die genaue Durchhangsfunktion zu ermitteln.

Die Kettenlinie entspricht mathematisch der Kurve einer Hyperbelfunktion (hyperbolischer Kosinus). Für ein Seil mit horizontalen Sehnen unter Eigengewicht (siehe Bild 4-3) gelten folgende Zusammenhänge:

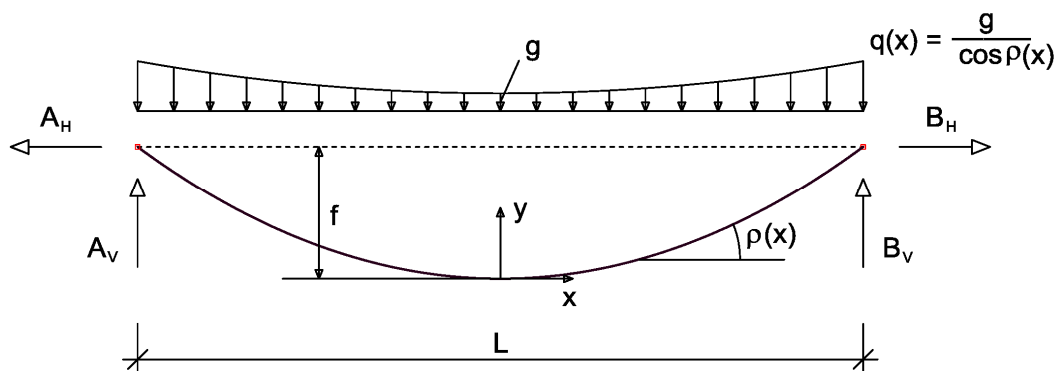


Bild 4-3 Seil mit horizontaler Sehne unter Eigengewicht

Die auf die Seilsehne bezogene vertikale Belastung eines Seils mit dem Eigengewicht g beträgt:

$$q(x) = \frac{g}{\cos \rho(x)}$$

Unter der Wirkung der veränderlichen Last $q(x)$ ergibt sich als Seildurchhangskurve die Kettenlinie mit den Ordinaten:

$$y(x) = k \cdot \left(\cosh \frac{x}{k} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad k = \frac{A_H}{g} = \frac{B_H}{g}$$

Die horizontale Auflagerkraft A_H (bzw. B_H) lässt sich iterativ aus der exakten Seilgleichung ermitteln:

$$\frac{2 \cdot A_H}{g} \cdot \sinh \frac{lg}{2 \cdot A_H} = s_0 \cdot (1 + \alpha_t \cdot \Delta t) + \frac{A_H^2}{E \cdot A \cdot g} \cdot \left(\frac{lg}{2 \cdot A_H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{2 \cdot lg}{A_H} \right)$$

Hierin bedeuten:

- s_0 Länge des Seils im unbelasteten Ausgangszustand (für $g = 0$)
- α_t Temperaturausdehnungskoeffizient ($\alpha_t = 1,2 \cdot 10^{-5}$ bei Stahlseilen)
- Δt Temperaturänderung
- E Elastizitätsmodul des Seilmaterials
- A Querschnitt des Seils

Die exakte Seilgleichung kann für beliebig große Seildurchhänge verwendet werden. Mit iterativer Auflösung der Seilgleichung können anschließend die Ordinatenwerte der Kettenlinie bestimmt werden. Weiterführende Berechnungsansätze für Seile mit beliebiger vertikaler Belastung oder Seile mit schrägen Sehnen können der Fachliteratur entnommen werden [Pałkowski 1990].

Für überschlägige Untersuchungen, besonders bei Seilen mit geringem Durchhang, kann vereinfachend angenommen werden, dass das Eigengewicht gleichmäßig entlang der Seilsehne verteilt ist. Die Durchhangskurve wird dann durch eine Parabel 2. Grades dargestellt.

4.3 Aufbau und Entwicklung von Hängedachformen

Hängedachflächen entstehen durch Kombination frei hängender Zuelemente (Seile), wobei diese nebeneinander und unabhängig vom Nachbarseil oder überschnitten und gekoppelt verlaufen können. Ausgehend von einem Einzelseil können die benachbarten Seile durch Vervielfältigungen und anschließenden Verschiebungen (Translationen) und / oder Verdrehungen (Rotationen) erzeugt werden. Translationen sind – bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem – in x-, y- oder z-Richtung (T_x , T_y oder T_z) möglich (siehe Bild 4-4).

Eine weitere Vervielfältigungsmöglichkeit besteht in der Rotation des Ausgangsseils – bezogen auf das Koordinatensystem – um die x-, y- oder z-Achse (siehe Bild 4-5). Eine Rotation um die x-Achse führt zu keiner sichtbaren Änderung, da das gedrehte Seil eine der Schwerkraft folgende Form annimmt, die der Ausgangsform entspricht.

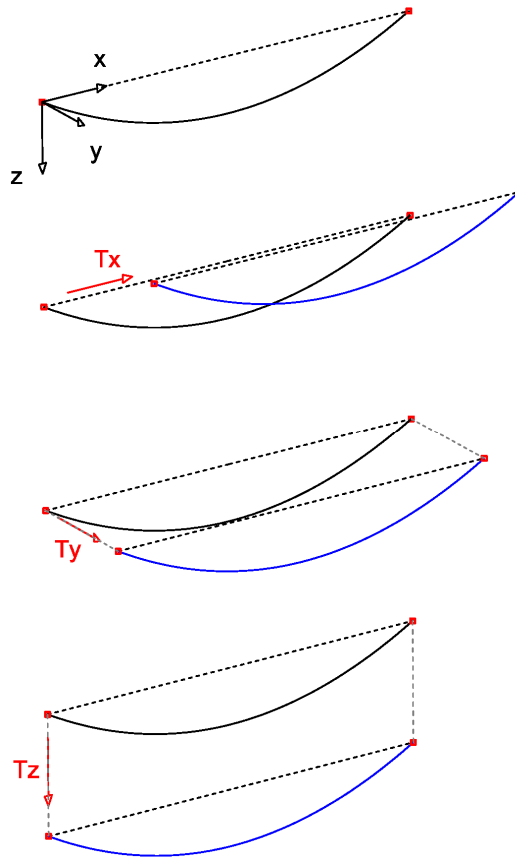


Bild 4-4 Seil mit kartesischem Koordinatensystem, Translationen T_x , T_y und T_z

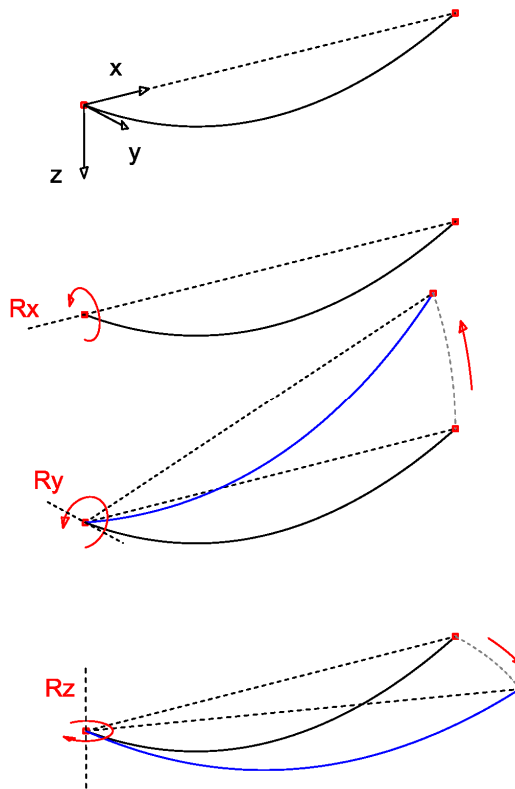


Bild 4-5 Seil mit kartesischem Koordinatensystem, Rotationen R_x , R_y und R_z

Darüber hinaus können die Seilparameter Durchhang f und Spannweite L variiert werden. Der Durchhang eines Einzelseils ergibt sich bei konstanter Spannweite in Abhängigkeit von der Seillänge L_S . Ebenso kann bei konstantem Durchhang die Spannweite (und damit die Seillänge) variiert werden (Bild 4-6). Beide Parameter lassen sich unabhängig voneinander einstellen.

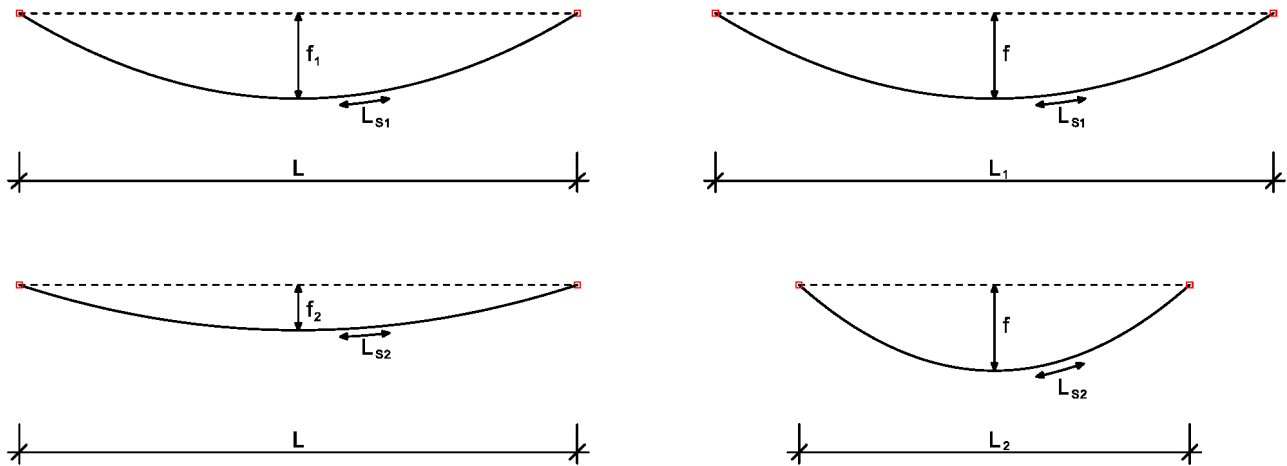


Bild 4-6 Zusammenhang zwischen Durchhang, Spannweite und Seillänge

links: Seil mit konstanter Spannweite L und unterschiedlichem Durchhang f ($L_{S1} > L_{S2}$)

rechts: Seil mit konstantem Durchhang f und unterschiedlicher Spannweite L ($L_{S1} > L_{S2}$)

Da bereits geringe Auflagerverschiebungen zu sehr großen Änderungen der Seillinie führen können, ist bei der Ermittlung einer realistischen Verformungsfigur besonders die elastische Verschieblichkeit der Auflagerpunkte zu berücksichtigen. Bereits geringe horizontale Auflagerverschiebungen führen bei konstanter Seillänge zu überproportional großen Veränderungen des Durchhangs (siehe Bild 4-7 und Bild 4-8).

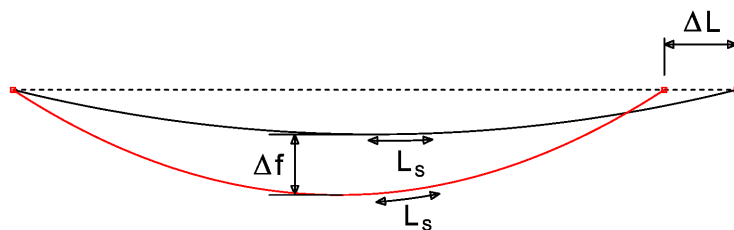


Bild 4-7 Auflagerverschiebung am Seil mit Änderung des Durchhangs

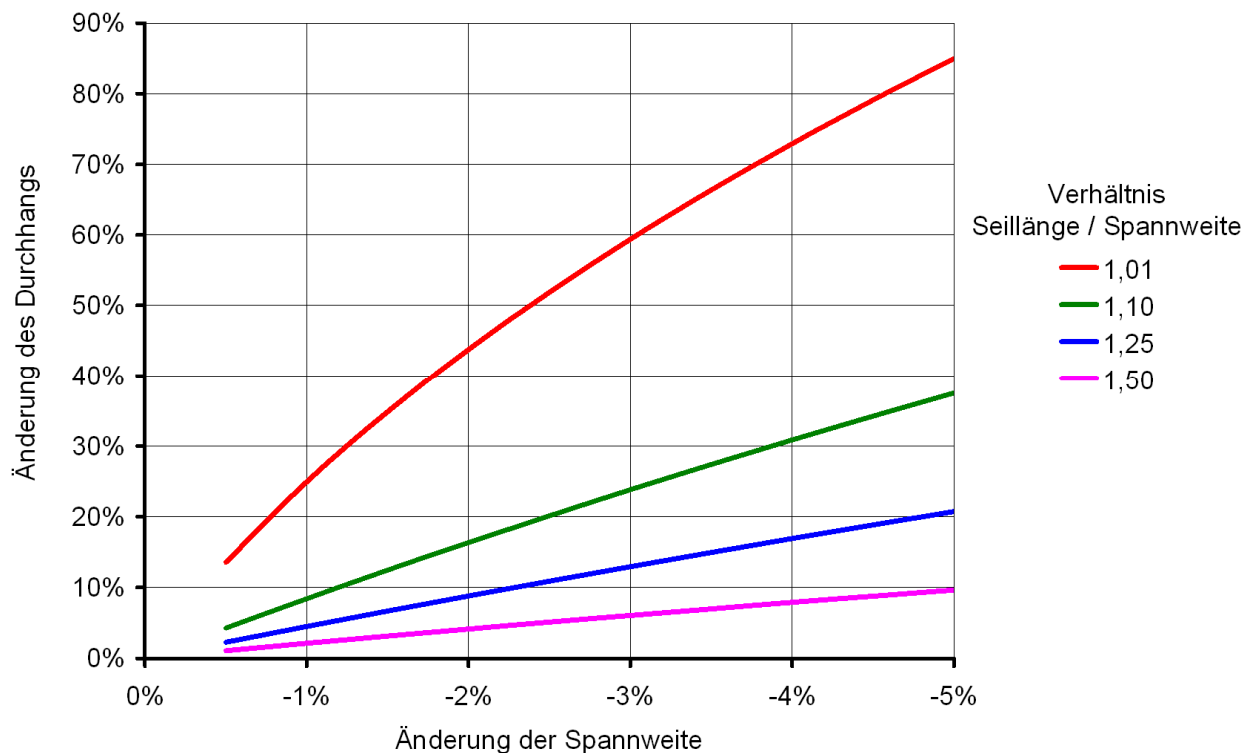


Bild 4-8 Zusammenhang zwischen Änderung der Spannweite und Änderung des Durchhangs bei verschiedenen Verhältnissen von Seillänge zu Spannweite

Sämtliche Hängedachformen lassen sich durch Variation der Parameter

- Translation
- Rotation
- Durchhang
- Spannweite

über Vervielfältigung aus Einzelseilen gegebenenfalls unter Anpassung der Randauflagerbedingungen konstruieren. Die Dachflächen werden dabei durch die Verbindung benachbarter Seilpunkte aufgespannt.

4.4 Formfindungsmodelle

Ein wichtiges Instrument beim Entwurf von Hängedächern sind Formfindungsmodelle. Im klassischen Modellbau werden dazu häufig Kettenmodelle verwendet. Modelle mit frei hängenden Ketten eignen sich sehr gut, da diese ideal biegeweich sind. Somit können sie auch im verkleinerten Modellmaßstab die verformte Dachgeometrie realistisch abbilden. In Bild 4-9 bis Bild 4-13 sind verschiedene Beispiele für Formfindungsmodelle dargestellt, die im Rahmen von studentischen Arbeiten am Institut für Tragwerksplanung der TU Braunschweig entworfen und gebaut wurden.

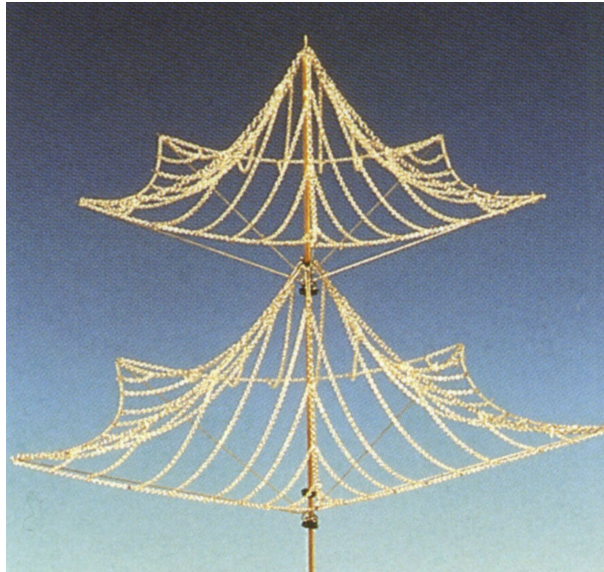


Bild 4-9 Hängemodell zum Studium von gewichtsstabilisierten Hängedächern [Otto 1995]

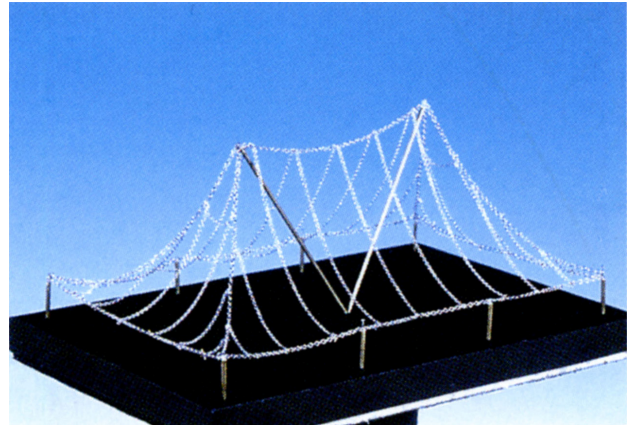


Bild 4-10 Hängemodelle zum Studium der Form asiatischer Dächer [Otto 1995]

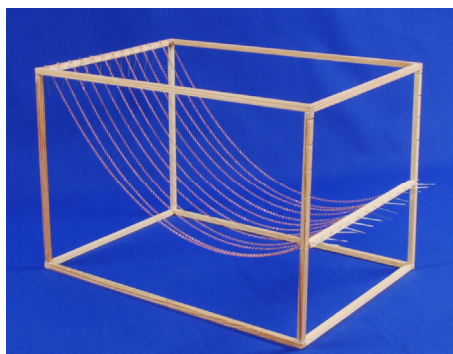


Bild 4-11 Kettenmodell mit unterschiedlich hohen geradlinigen Rändern

Formfindungsmodelle lassen sich auch in computergestützten Berechnungen erzeugen. Neben der reinen Darstellung von Hängeformen lassen sich darüber hinaus Verformungen sowie Seil- und Auflagerkräfte bestimmen.

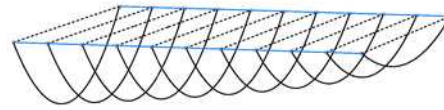
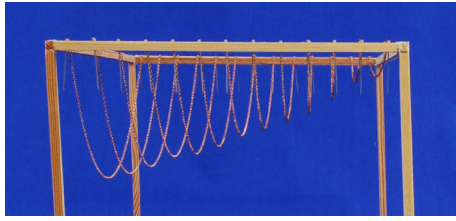


Bild 4-12 Dachform mit zunehmendem Durchhang zu einer Längsseite

links: Kettenmodell

rechts: Computermodell

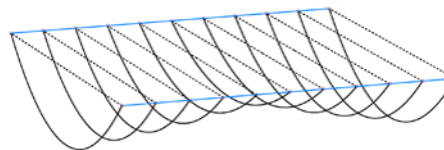


Bild 4-13 Dachform mit zunehmendem Durchhang zu beiden Längsseiten

links: Kettenmodell

rechts: Computermodell

Bei experimentellen Formfindungsmodellen wird im Regelfall nur der Lastfall „Eigengewicht“ betrachtet. Ungleichmäßige Flächen- oder Einzellasten, elastische Verformungen, Temperaturdehnungen oder Vorspannungen der hängenden Seile werden zunächst vernachlässigt. Zudem wird üblicherweise vorausgesetzt, dass sich die Zugglieder ideal biegeweich verhalten.

Computergestützte Berechnungen bieten die Möglichkeit einer detaillierten Untersuchung verschiedener Varianten bei geringerem Aufwand. Daher werden im Weiteren numerische Analysen zu Hängedachformen durchgeführt.

4.5 Formenkatalog

Bei der computergestützten Berechnung von Formfindungsmodellen können detaillierte Betrachtungen unter Einbeziehung verschiedener Parameter durchgeführt werden. Hierzu eignen sich verschiedene Programmsysteme, z. B. auf Basis der Finite-Elemente-Methode.

Mit dem Programm „InfoCad“ der Firma InfoGraph GmbH lassen sich räumliche Seiltragwerke modellieren und visualisieren. Hierzu stehen Seilelemente zur Verfügung, die nach der Theorie großer Verschiebungen berechnet werden. Die Geometrie der Elemente wird durch zwei äußere Knoten, welche vom Anwender vorgegeben werden, und einen inneren Knoten, der vom Programm erzeugt wird, beschrieben. Jeder Knoten hat die globalen Verschiebungsfreiheitsgrade u_x , u_y , und u_z . Damit kann im Element ein linear veränderlicher Verlauf der Seilkraft realisiert werden. Es wird ein linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt. Eine Seilvorspannung kann zusätzlich berücksichtigt werden.




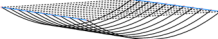
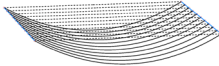
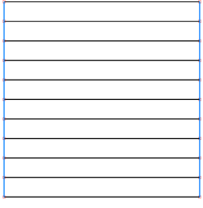
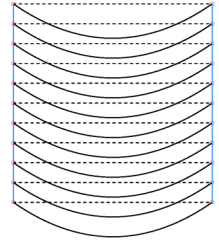
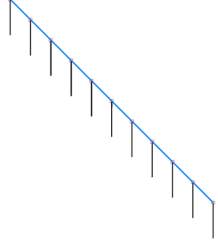
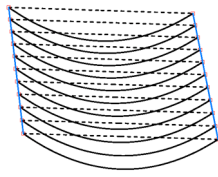
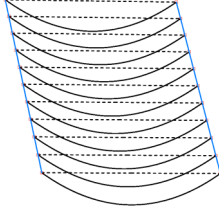
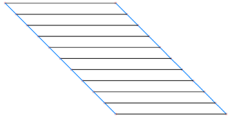
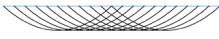

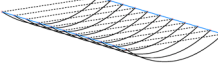
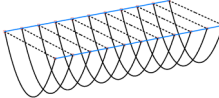
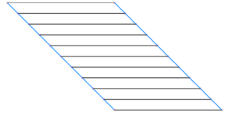
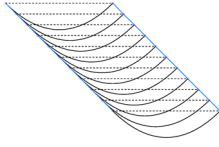
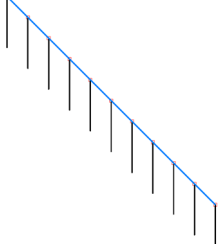
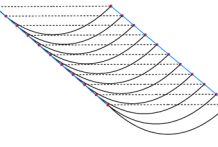
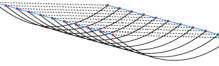
In der eigenen Untersuchung unterschiedlicher Formfindungsmodelle werden nachfolgend verschiedene Seiltragwerke mit InfoCad berechnet und visualisiert. Die Analysen dienen zunächst der Ermittlung der verformten Dachgeometrie. Die lastweiterleitenden Konstruktionen werden nachfolgend in Kapitel 5.4 eingehender betrachtet. Die Lagerung der Seilelemente wird zunächst starr und ideal-gelenkig angenommen. Zur Formfindung werden die unterschiedlichen Seilmodelle ausschließlich durch das Eigengewicht belastet.

Für jede der berechneten Formen wird die Draufsicht (in z-Richtung) sowie zwei Seitenansichten (entgegen der y- bzw. x-Richtung) angegeben. Die beiden Isometrien sind aus verschiedenen Blickwinkeln mit der jeweils aussagekräftigsten Darstellung gewählt.

Die blau dargestellten „Ränder“ stellen Hilfslinien zur besseren Orientierung dar und sollen keine Aussage über die Art der Randausbildung machen. Entlang der Ränder verlaufen die Aufhängepunkte der Seile. Die Seilauflagerkräfte werden entlang der Ränder – zerlegt in ihre vertikalen und horizontalen Komponenten – bestimmt und nachfolgend näher betrachtet (siehe Kapitel 4.6.3). Die „freien Ränder“, die parallel zu den äußeren Seilen verlaufen, sind dadurch definiert, dass an ihnen keine Kräfte übertragen werden.

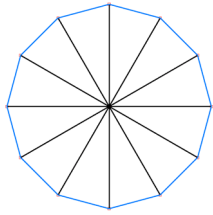


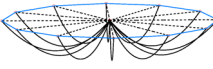
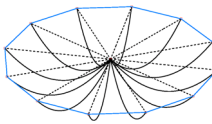
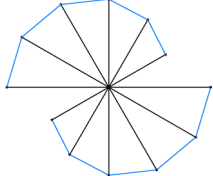
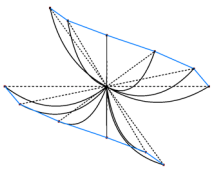
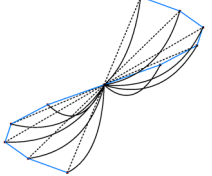
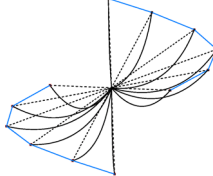
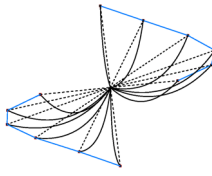
Im Folgenden werden die Formen nach ihren in der ersten Spalte angegebenen Nummern (Nr.) bezeichnet.

Tabelle 4-1 Reine Translationsformen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
1					
2					
3					
4					

Eine geometrisch einfache Hängeform entsteht durch wiederholte, gleichmäßige Translation eines Einzelseils rechtwinklig zur Seilebene (y-Richtung) (1). Die Figur überspannt eine rechteckige Grundfläche. Bei alleiniger Verschiebung in x- oder in z-Richtung entsteht keine Hängefläche. Erst ergänzt durch eine Verschiebung T_y ergeben sich mögliche Dachflächen (2) und (3). Form (4) stellt eine Kombination aus allen drei Verschiebungen dar.

Tabelle 4-2 Reine Rotationsformen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
5					
6					

Durch mehrfache, gleichmäßige Rotation des Einzelseils um die z-Achse werden Hängeflächen über kreisrundem Grundriss erzeugt (5). Durch die einfache Rotation um die x- oder y-Achse lassen sich wiederum keine Hängefiguren aufspannen, die Kombination von R_y und R_z generiert jedoch eine „schraubenförmige“ Form (6).

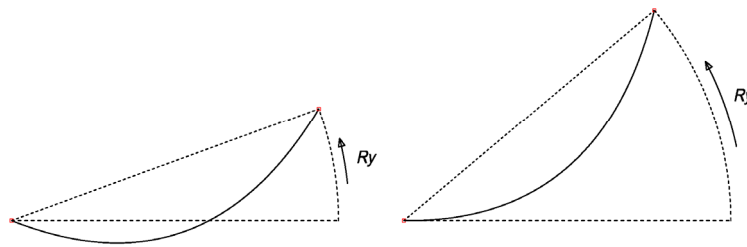


Bild 4-14 Rotation des Einzelseils um die y-Achse

links: kleiner Rotationswinkel, Tiefpunkt des gedrehten Seils liegt unterhalb des niedrigeren Aufhängepunkts

rechts: großer Rotationswinkel, Tiefpunkt des gedrehten Seils ist identisch mit niedrigerem Aufhängepunkt

Durch Rotation des Ausgangsseils um die y-Achse entsteht ein Seil mit unterschiedlich hohen Aufhängepunkten. Je nach Größe des Rotationswinkels liegt der Tiefpunkt des gedrehten Seils weiterhin unterhalb des niedrigeren Aufhängepunkts oder er ist mit dem unteren Aufhängepunkt identisch.

Tabelle 4-3 Translations- bzw. Rotationsformen aus Ausgangsseil mit unterschiedlichen Aufhängehöhen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
7					
8					
9					
10					

Verwendet man dieses gedrehte Seil als Grundlage für die oben beschriebenen Translationen und Rotationen, so ergeben sich modifizierte Formen. Aus Form (1) entstehen die Formen (7) oder (8), aus Form (5) bilden sich Form (9) oder (10).

Weitere Formen, die sich allein aus Translationen und Rotationen aus einem Ausgangsseil bei gleicher Spannweite und gleichem Durchhang ergeben, zeigen die nachfolgenden Tabellen 4-4 bis 4-7 sowie Figur (41).

Tabelle 4-4 Translationsformen aus Ty und Tz

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
11					
12					

Das Seil wird zugleich gleichmäßig in y-Richtung und ungleichmäßig in z-Richtung verschoben, so dass die Aufhängepunkte jeweils einen stehenden (11) bzw. einen „hängenden“ Bogen (12) markieren.

Tabelle 4-5 Formen aus Rotation um vertikale Achse in Seilmitte

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
13					
14					
15					

Durch eine Verschiebung des Ausgangsseils um die halbe Seillänge entgegen der x-Richtung (Ursprung des Koordinatensystems in Seilmitte) und anschließende gleichmäßige Rotationen R_z entsteht eine im Grundriss kreisrunde Form gemäß (13). Durch eine nachträgliche Rotation R_y werden hieraus (14) oder (15).

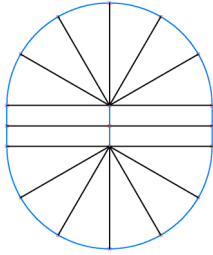


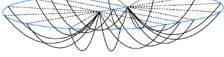
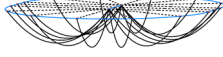
Tabelle 4-6 Formen aus Rotation um vertikale Achse außerhalb der Seillänge

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
16					
17					
18					
19					

Eine ähnliche, im Grundriss einen Kreisring bildende Form entsteht, wenn die vorgeschaltete Translation in x-Richtung den Ursprung (und damit die z-Drehachse) außerhalb der Seillänge verlegt (16). Wählt man von diesem Kreisring einen Ausschnitt und verschiebt die Seile anschließend jeweils in x-Richtung, so dass die Aufhängepunkte entlang einer Geraden verlaufen, entsteht eine Form, die im Grundriss annähernd ein Parallelogramm darstellt (17).

Aus Form (16) werden durch Verwendung eines Ausgangsseils mit unterschiedlich hohen Aufhängepunkten Form (18) oder (19).

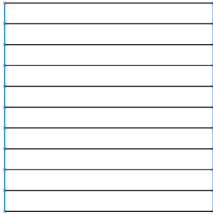
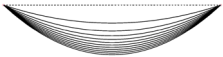

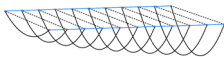


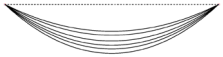

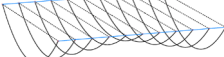

Tabelle 4-7 Zusammengesetzte Form

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
20					

Die bisher aufgezeigten Figuren können ausschließlich über die Parameter „Translation“ und „Rotation“ beschrieben werden. Zusätzliche Hängedachformen lassen sich durch Addition von Einzelflächen erzeugen, wie z. B. Form (20).

Darüber hinaus können zusätzlich die Parameter „Spannweite“ und „Durchhang“ verändert werden, d. h. benachbarte Seile weisen unterschiedliche Geometrien auf.

Tabelle 4-8 Translationsformen mit veränderlichem Seildurchhang

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
21					
22					

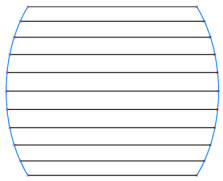
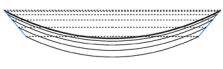
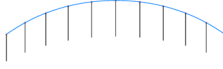
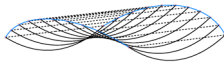

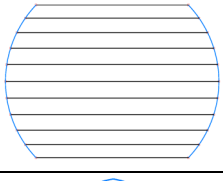


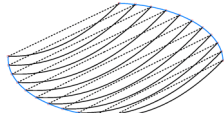
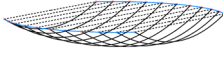
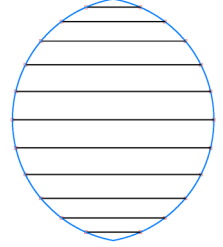
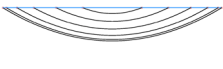

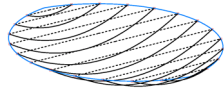
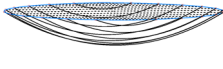
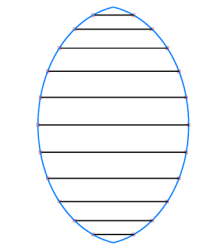
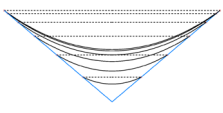
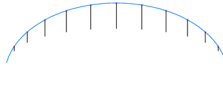
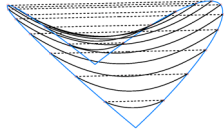
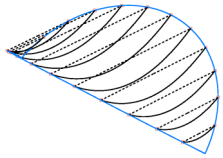
Durch Veränderung des Durchhangs wird die Form (1) in die Formen (21) oder (22) überführt.

Tabelle 4-9 Formen aus T_y und R_y mit veränderlicher Seillänge

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
23					
24					
25					

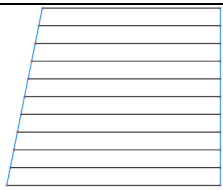


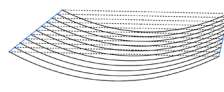
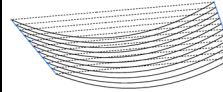
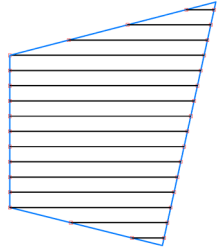


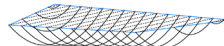
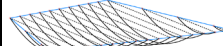
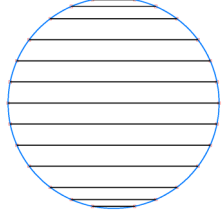
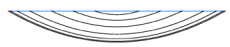

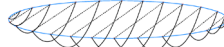

Die Formen der Tabelle 4-9 entstehen aus Translationen T_y , wobei jedes Seil eine zusätzliche Rotation R_y erfährt, so dass die Auflagerpunkte Geraden oder vertikal stehende oder hängende Bogen beschreiben. Die Spannweiten bleiben konstant, die Seillängen sind an den dargestellten Beispielen jeweils unterschiedlich.

Tabelle 4-10 Translationsformen mit unterschiedlichen Spannweiten und Durchhängen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
26					
27					
28					
29					

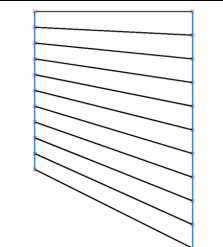

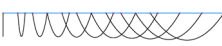
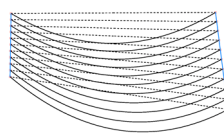
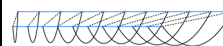
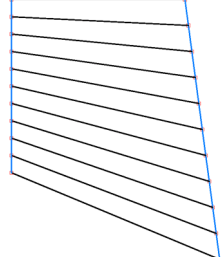

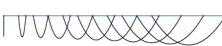
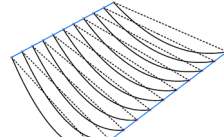
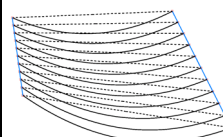
In Tabelle 4-10 sind Formen dargestellt, die ausschließlich durch Translationen entstehen. Ihre Aufhängepunkte folgen liegenden oder schräg verlaufenden Bogen. Die benachbarten Seile weisen unterschiedliche Spannweiten und Durchhänge auf.

Tabelle 4-11 Weitere Translationsformen mit unterschiedlichen Spannweiten und Durchhängen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
30					
31					
32					

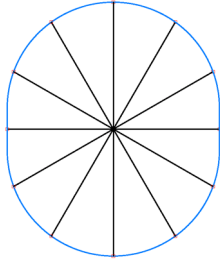


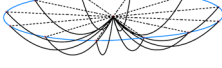
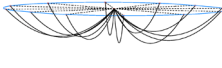
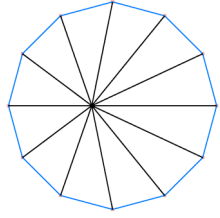
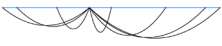

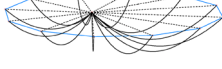
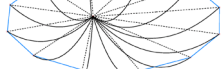
Die Formen in Tabelle 4-11 entstehen durch Translationen T_y mit variierenden Spannweiten und Durchhängen, so dass in der Draufsicht trapezförmige (30), viereckige (31) oder kreisrunde (32) Grundrisse überspannt werden.

Tabelle 4-12 Rotationsformen mit unterschiedlichen Spannweiten und Durchhängen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
33					
34					

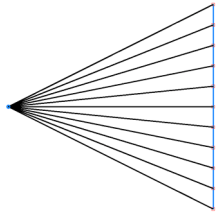

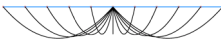
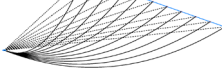

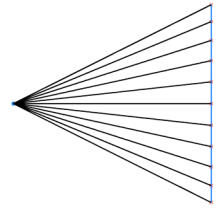
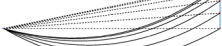
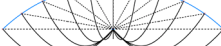
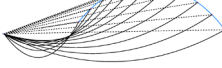
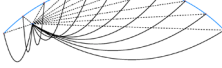
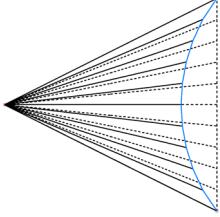

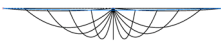
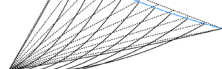
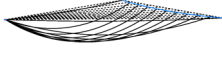
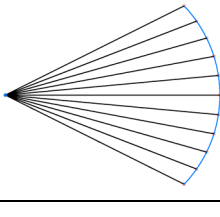


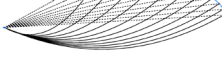
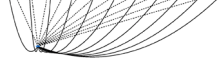
Bei den Figuren aus Tabelle 4-12 werden durch Rotation R_y um eine durch vorherige Verschiebung T_x weit entfernt liegende Achse Trapez- (33) bzw. Viereckgrundrisse (34) mit veränderlichen Spannweiten überspannt.

Tabelle 4-13 Rotationsformen aus Rz mit veränderlichen Spannweiten und Durchhängen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
35					
36					

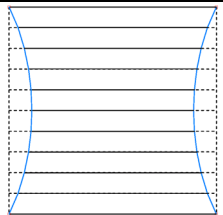


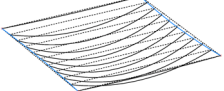
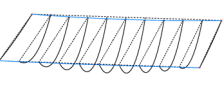
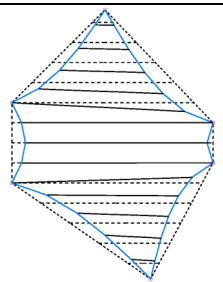
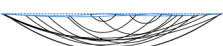

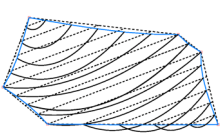
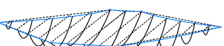
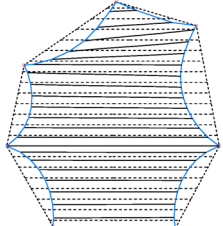

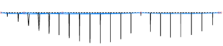
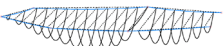
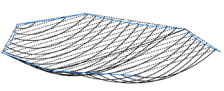
Auch ovale Formen lassen sich – bei unterschiedlichen Spannweiten und Durchhängen – durch reine Rotation um die z-Achse erzeugen (35). Über einem kreisrunden Grundriss können unregelmäßige Flächen durch Rotationen Rz generiert werden (36).

Tabelle 4-14 Kreissegmentformen aus Rotationen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
37					
38					
39					
40					

Durch Rotationen R_z erzeugte Kreissegmente überspannen dreieckige Grundrissgeometrien, wobei die Linie der Aufhängepunkte unterschiedlich ausgebildet werden kann (Tabelle 4-14).

Tabelle 4-15 Hängeformen mit Randseilen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
41					
42					
43					

Elastisch verschiebbliche Aufhängepunkte, wie sie bei der Verankerung an einem Randseil auftreten, führen zu zusätzlichen Verformungen (siehe Kapitel 4.3). Das einfache, durch Translation T_y erzeugte Modell aus Figur (1) bildet eine veränderte Form, wenn man die Seile nicht starr, sondern zwischen zwei in den Ecken gehaltenen Randseilen elastisch verschieblich verankert (41).

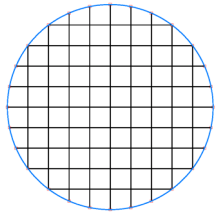


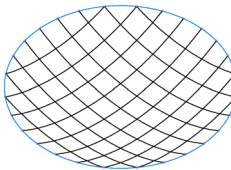
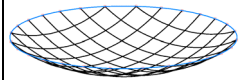
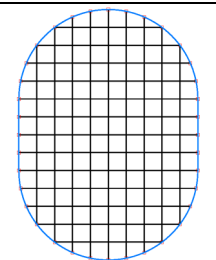


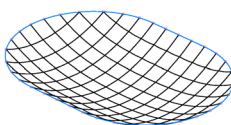
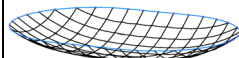
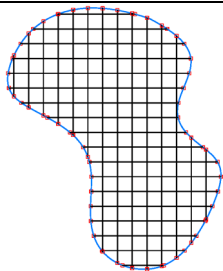
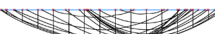
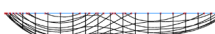
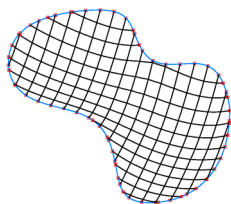
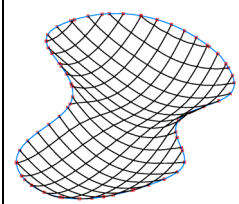
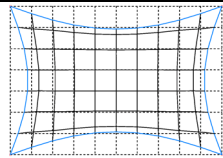


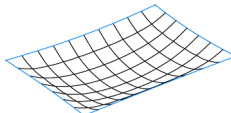

Weitere Beispiele mit Randseilen zeigen die Formen (39) (über dreieckigem Grundriss), (42) und (43) (über beliebigem, polygonalen Grundriss) sowie (53) (mit zwei Seilscharen).

Tabelle 4-16 Zuggliedanordnungen bei unregelmäßigen Grundrissen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
44					
45					
46					
47					
48					
49					

Auch unregelmäßige Grundrisse können durch Variation der Seillängen und der Durchhänge der Zugelemente überspannt werden, siehe Formen (42), (43), (44) bis (49) und (52).

Tabelle 4-17 Formen aus hängenden Seilnetzen

Nr.	Draufsicht	Ansicht x-z	Ansicht y-z	Isometrie 1	Isometrie 2
50					
51					
52					
53					

Sonderfälle von Hängeformen entstehen, wenn sich mehrere Seilscharen kreuzen, so dass ein flächiges Seilnetz entsteht. Die Figuren (50) bis (53) zeigen Netze aus zwei rechtwinklig angeordneten Seilscharen mit orthogonalen Maschen. Seilscharen, die sich schiefwinklig überschneiden, können unterschiedliche vieleckige Maschengeometrien erzeugen.

Der dargestellte Formenkatalog verdeutlicht, dass sich jede Hängeform auf Einzelseile zurückführen lässt, die durch Translationen und / oder Rotationen sowie Änderungen der Spannweite oder des Durchhangs gebildet werden. Durch Addition oder Reihung von Einzelflächen können wie bei Figur (20) differenziertere Formen zusammengefügt werden. An den Verbindungspunkten zweier Auflagerlinien oder -punkte entstehen dabei so genannte „Zwischenunterstützungen“ (siehe Kapitel 4.6.7)

4.6 Analyse und Bewertung

4.6.1 Kriterien zur Analyse und Bewertung

Zur Analyse und Bewertung von Hängedachformen können Kriterien genutzt werden, die unterschiedliche Aspekte bzw. Merkmale beschreiben. Auf der Grundlage der aus Einzelseilen gebildeten Hängeformen lassen sich verschiedene Einzelkriterien zu den beiden Gruppen „Lastabtragung / Kräfteverlauf“ und „Dachform“ zuordnen. Die folgende Übersicht zeigt eine Zusammenstellung dieser Kriterien.

1. Lastabtragung / Kräfteverlauf

- Zuggliedanordnung
- Größe der Seilkräfte
- Verschieblichkeit der Auflagerpunkte

2. Dachform

- Grundrissform
- Krümmung der Dachfläche
- Verlauf der Verbindungslinie der Tiefpunkte
- Form der Auflagerlinien
- Einlaufwinkel an den Auflagerlinien
- Ausbildung der freien Ränder

Darüber hinaus lassen sich weitere Kriterien betrachten, die nicht unmittelbar durch die Hängedachform festgelegt sind, sondern von weiteren Randbedingungen abhängen. Dazu gehören z. B. bei elementartiger Ausbildung der Dacheindeckung die Form, Krümmung und Einheitlichkeit der Einzelelemente.

Das Verhalten des Hängedachs wird auch wesentlich durch die Eigenschaften des Baumaterials sowie die Konstruktion der Dacheindeckung bestimmt, die in den Seilmodellen nicht festgelegt sind. Bei doppelt gekrümmten Hängedachformen kann bei Ausbildung einer steifen Dacheindeckung eine Schalenwirkung erzielt werden, die zur Stabilisierung der Dachfläche beiträgt. Derart ausgeführte Hängedächer weisen zudem gute Dämpfungseigenschaften bei dynamischen Beanspruchungen auf.

Diese Kriterien sind entscheidend von weiteren, formunabhängigen Randbedingungen abhängig, wie z. B. Bauart, Baumaterial, Bauablauf oder Herstellungskosten. Die Beurteilung verschiedener Hängedachformen orientiert sich daher hauptsächlich an den genannten Hauptkriterien. Nachfolgend wird auf verschiedene Einzelkriterien näher eingegangen und deren Ausprägungsarten anhand von Beispielen aus dem Formenkatalog verdeutlicht.

4.6.2 Zuggliedanordnung

Die Anordnung der Zugglieder kann unterschieden werden in:

- parallel
- radial
- aufgefächert
- gekreuzt
- sonstige

Die parallele Zuggliedanordnung liegt vor, wenn die Ebenen der einzelnen Seile einen gleich bleibenden Abstand aufweisen. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Form durch eine Translation in y-Richtung erzeugt wird, siehe Form (1) bis (4), (7), (8), (11), (12), (21) bis (32), (41) bis (44), (46) bis (48).

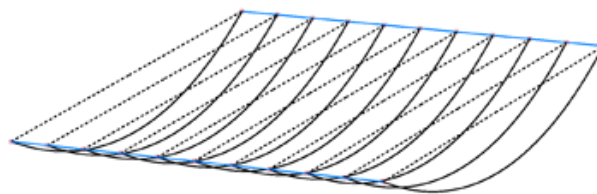


Bild 4-15 Translationsform mit parallelen, unterschiedlich hohen Auflagerlinien, Form (7)

Die Spannrichtung ist einachsig von einem zum gegenüberliegenden Rand. Eine parallele Seilanordnung bietet sich bei rechteckigen Grundrissen an. Die Seile liegen dann parallel zu den Längsseiten und laufen im Grundriss rechtwinklig auf die Ränder zu.

Bei einer radialen Zuggliedanordnung laufen alle Seilachsen in einem zentralen Drehpunkt zusammen bzw. sie überkreuzen sich dort, z. B. Figuren (5), (6), (9), (10), (13) bis (16), (18), (19), (35) bis (40).

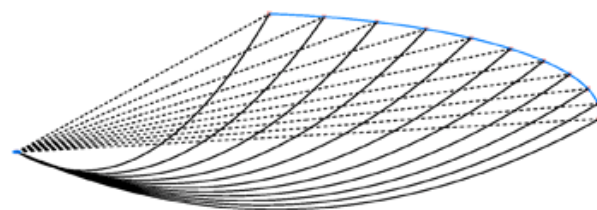


Bild 4-16 Rotationsfigur mit liegendem Randbogen, Form (40)

Das Zentrum kann durch einen Einzelpunkt gebildet werden. Alternativ ist die Ausführung eines zentralen Kreistrings möglich. Die Spannrichtung verläuft radial vom Zentrum zum äußeren Rand, der bei kreisförmigen Grundrissen durch einen Ring gebildet wird. Radiale Seilanordnungen sind auch bei anderen Grundrissgeometrien möglich, bieten sich aber bevorzugt bei runden Grundflächen an.

Eine aufgefächerte Zuggliedanordnung ist ein spezieller Fall der radialen Anordnung, bei dem der zentrale Drehpunkt außerhalb der zu überspannenden Fläche liegt (Formen (17), (33), (34), (45)). Diese Form bietet sich bei viereckigen Grundrissen an, deren Längsseiten in Richtung der Zugglieder liegen.

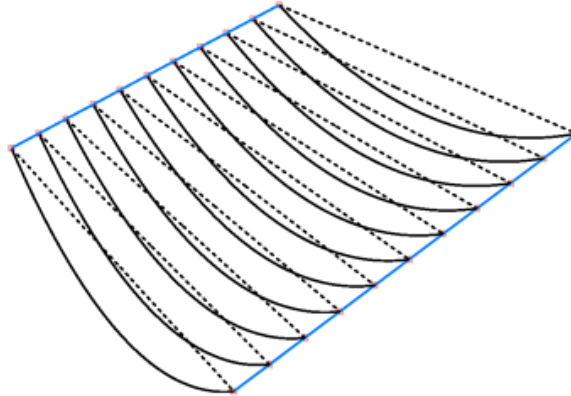


Bild 4-17 Trapezförmiger Grundriss mit aufgefächelter Zuggliedanordnung, Form (34)

Die gekreuzte Seilanordnung ist wiederum ein Sonderfall zweier sich überschneidender Seilscharen. Beide Seilscharen sind hierbei durchhängend und in den Kreuzungspunkten miteinander verbunden, so dass sich die resultierende Form infolge der gegenseitigen Beeinflussung einstellt. In den dargestellten Beispielen Form (50) bis (53) verlaufen die Seilscharen rechtwinklig zueinander, aber auch andere Kreuzungswinkel sind möglich. Mit diesen hängenden Seilnetzen können gleichermaßen eckige wie runde oder frei geformte Flächen überspannt werden.

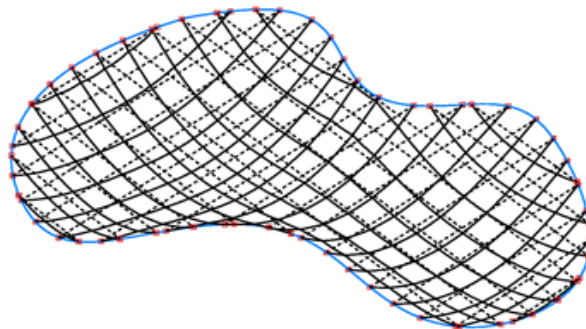


Bild 4-18 Seilnetz aus rechtwinklig angeordneten Seilscharen über ungleichförmigem Grundriss, Form (52)

Die Anordnung der Seile ist auch gänzlich unsystematisch möglich, wie es in Figur (49) dargestellt ist. Dieses Vorgehen kann bei ungleichförmigen Grundrissen genutzt werden, um die Spannweite der Seile minimal zu halten.

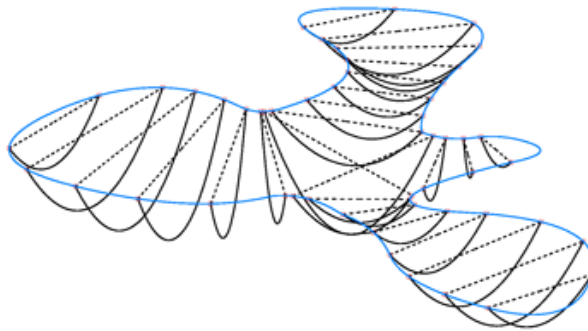


Bild 4-19 Ungleichförmiger Grundriss mit variierenden Seillängen und Durchhängen, Form (49)

4.6.3 Größe und Verteilung der Seilkräfte an der Auflagerlinie

Eine weitere Besonderheit des Seils als statisches Tragelement ist, dass sich an den unverschieblichen Auflagerpunkten nicht nur vertikale, sondern auch horizontale Auflagerkräfte einstellen, auch wenn ausschließlich vertikale Lasten auf das System einwirken.

Im Folgenden wird von einer gleichmäßigen Belastung des Seils ausgegangen (Bild 4-20 ff.). Die horizontalen Auflagerkräfte A_H und B_H sind stets gleich groß und entgegengesetzt nach außen gerichtet:

$$A_H = B_H = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f}$$

Die vertikalen Auflagerkräfte A_V und B_V sind abhängig von der Geometrie des statischen Systems. Für den Fall eines zwischen zwei höhengleichen Punkten hängenden Seils (Bild 4-20) sind die vertikalen Auflagerkräfte gleich groß:

$$A_V = B_V = \frac{q \cdot L}{2}$$

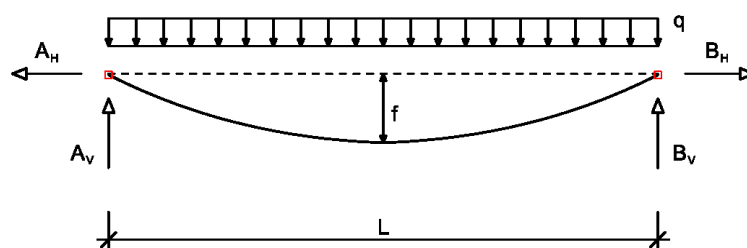


Bild 4-20 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit höhengleichen Auflagern

Für Seile mit Endverankerungen in unterschiedlich hohen Punkten (Bild 4-21) sind die vertikalen Auflagerkräfte auch von der Höhendifferenz abhängig:

$$A_V = \frac{q \cdot L}{2} \cdot \left(1 - \frac{h}{4 \cdot f}\right) = \frac{q \cdot L}{2} - \frac{h}{L} \cdot A_H$$

$$B_V = \frac{q \cdot L}{2} \cdot \left(1 + \frac{h}{4 \cdot f}\right) = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{h}{L} \cdot B_H$$

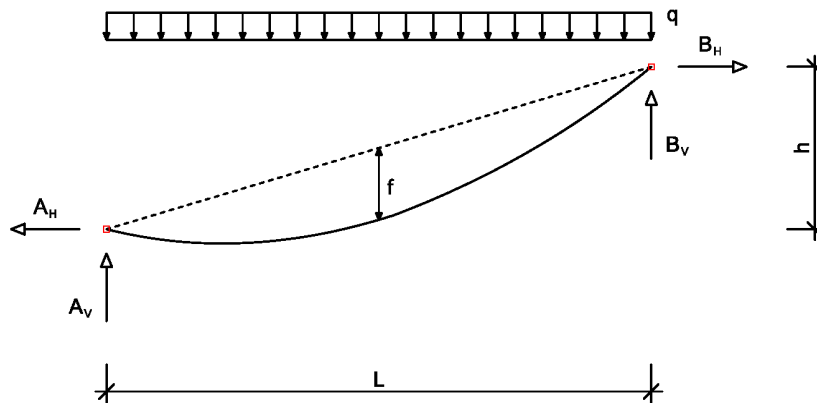


Bild 4-21 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit unterschiedlich hohen Auflagern

Ein Sonderfall liegt vor, wenn die Höhendifferenz der Auflager so groß ist, dass das tiefer gelegene Lager gleichzeitig den Tiefpunkt des Systems darstellt (Bild 4-22). Die Seiltangente verläuft dort horizontal, der vertikale Anteil der Seilkraft ist Null:

$$A_V = 0 \quad B_V = q \cdot L \quad \text{mit} \quad f = \frac{h}{4}$$

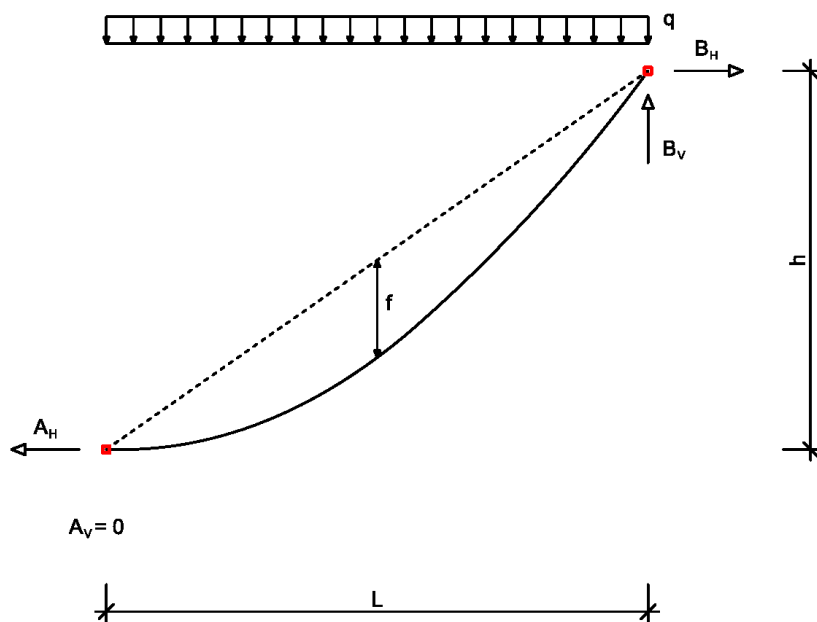


Bild 4-22 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit unterschiedlich hohen Auflagern und horizontaler Seiltangente am tieferen Auflager

Die vertikalen Auflagerkräfte steigen direkt proportional zur Last und zur Spannweite des Seils an. Die horizontalen Auflagerkräfte nehmen proportional zur Last, aber überproportional zur Spannweite zu. Sie sinken jedoch proportional bei Vergrößerung des Durchhangs, d. h. eine Vergrößerung der Spannweite oder eine Verringerung des Durchhangs lässt die horizontalen Auflagerkräfte stark anwachsen (Bild 4-23).

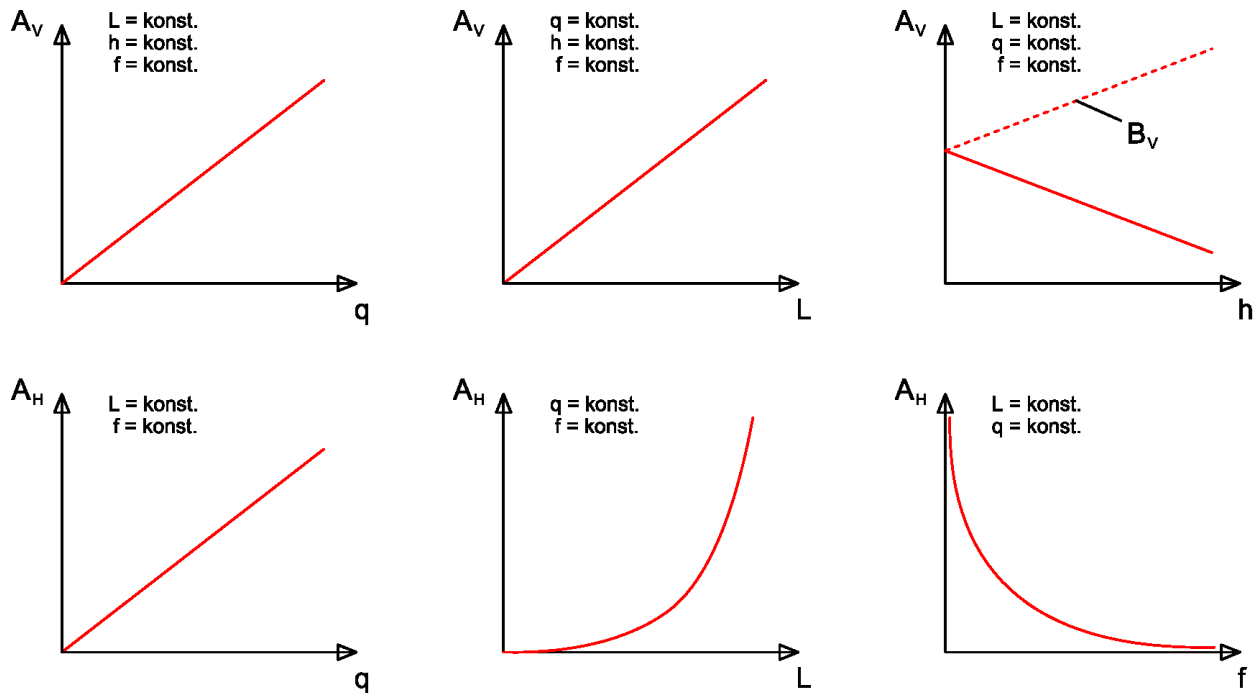


Bild 4-23 Zusammenhang zwischen Auflagerkräften A_V und A_H sowie Last q , Spannweite L , Durchhang f bzw. Höhenunterschied der Auflager h

Ein Seil lässt sich infolge seines Eigengewichts niemals ideal horizontal spannen, so dass der Durchhang f zu Null wird, weil hierzu unendlich große Horizontalkräfte nötig wären (Bild 4-24 und Bild 4-25).

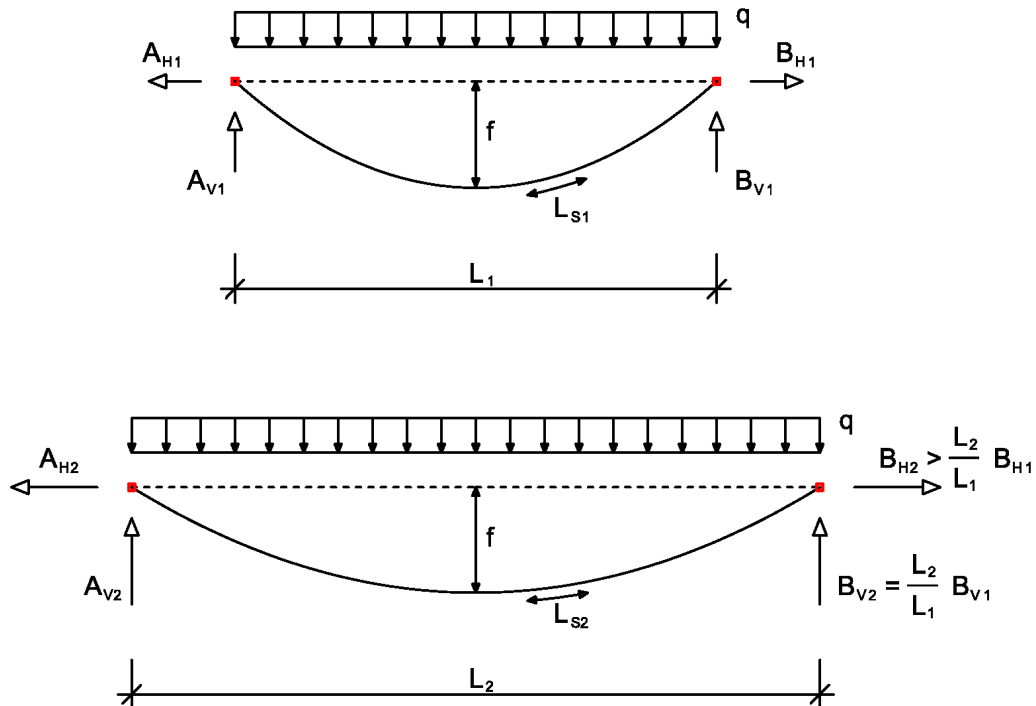


Bild 4-24 Zusammenhang zwischen Spannweite und Auflagerkräften bei konstantem Durchhang: eine Vergrößerung der Spannweite vergrößert die vertikalen Auflagerkräfte proportional, die horizontalen Auflagerkräfte vergrößern sich überproportional

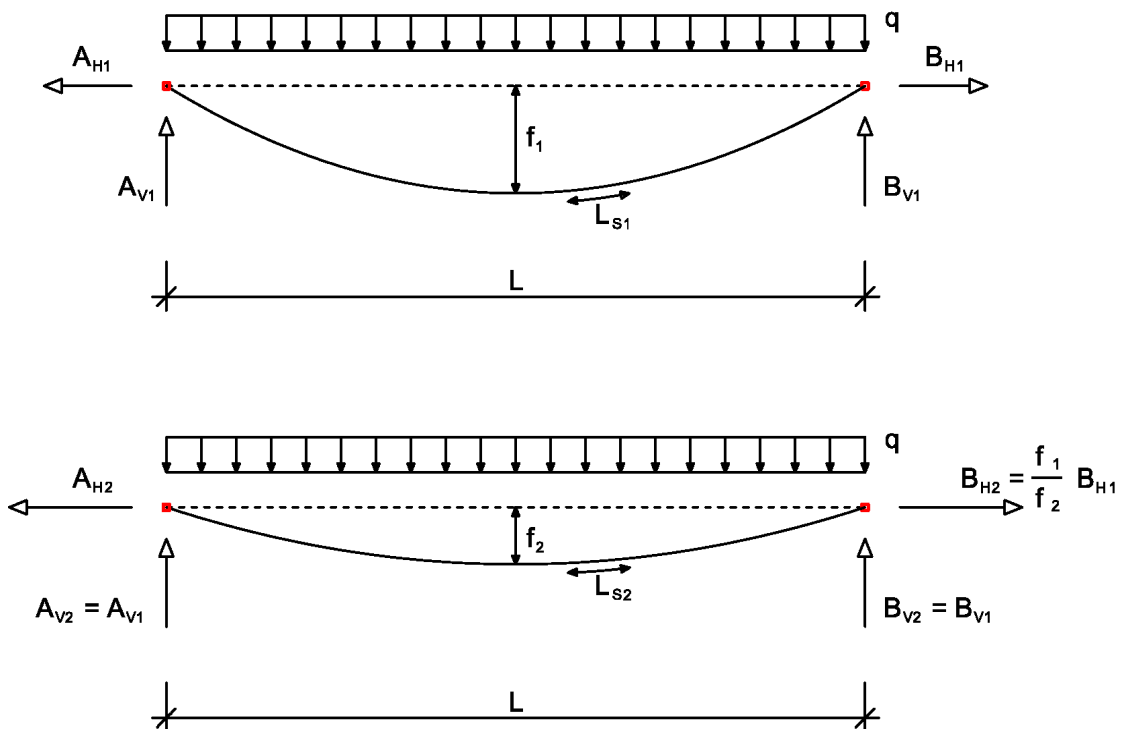


Bild 4-25 Zusammenhang zwischen Durchhang und Auflagerkräften bei konstanter Spannweite: eine Verkleinerung des Durchhangs vergrößert die horizontalen Auflagerkräfte, die vertikalen Auflagerkräfte bleiben unverändert

Da das primäre Einsatzgebiet von Hängedachkonstruktionen das Überspannen großer Grundrisse ist, stellt die Aufnahme und Weiterleitung der horizontalen Auflagerkräfte einen entscheidenden Punkt bei der Planung und dem Entwurf von Hängedächern dar. Die vertikalen Auflagerkräfte sind infolge des geringen Dachgewichts auch bei zusätzlicher Schneelast in der Regel verhältnismäßig klein. Ihre Weiterleitung stellt daher nur geringe Anforderungen an das Bauwerk.

Die schräg am Auflagerpunkt angreifenden Seilkräfte können für die Betrachtungen zur Lastweiterleitung in ihre horizontalen und vertikalen Komponenten zerlegt werden. Je flacher sich die Seilneigung ρ einstellt, desto größer wird der horizontale Anteil der Lagerkraft (Bild 4-26).

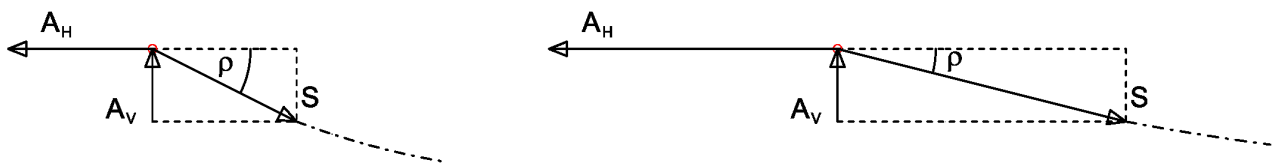


Bild 4-26 Kräftegleichgewicht am Auflagerpunkt bei großer (links) und geringer Seilneigung ρ (rechts)

Die Linien, entlang derer die Auflagerpunkte der Seile einer Hängefläche angeordnet sind, können unterschiedliche Formen (gerade, geneigt, gebogen, geknickt) haben. Ihre Geometrie hat Einfluss auf die Weiterleitung der Seilaullagerkräfte.

Dachformen, die durch Translationen oder Rotationen R_z des gleichen Seils mit konstanter Spannweite und konstantem Durchhang entstanden sind, weisen an ihren Auflagerpunkten jeweils identische Auflagerkräfte auf, siehe Formen (1) bis (6), (9) bis (13), (16) bis (19) auf Seite 52 ff. Bei den Formen (7) und (8) sind die Auflagerkräfte entlang der Auflagerlinien gleichmäßig verteilt, die vertikalen Kräfte sind jedoch am tieferen Auflagerpunkt kleiner.

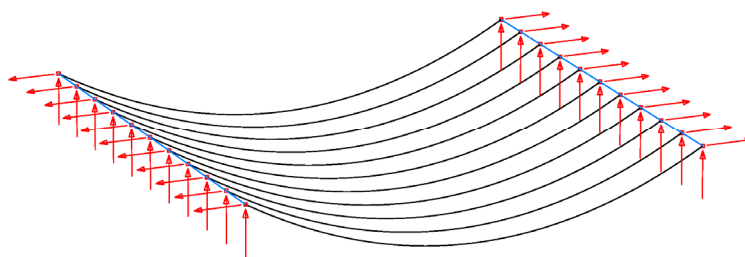


Bild 4-27 Translationsfläche mit identischen Auflagerkräften der Zugelemente, Form (1)

Die Lagerung der Seilelemente wird in den Formmodellen unverschieblich und ideal-gelenkig angenommen. Die Bauteile, an denen die Zugelemente des realen Hängedachs befestigt werden, können die Seilkräfte sowohl über Biegung, als auch über Druck oder Zug an anschließende Konstruktionen weiterleiten. Sie verformen sich unter dieser Last in Abhängigkeit von ihrer Steifigkeit. Ihr Tragverhalten steht daher in einer engen Interaktion mit der Form und dem Tragverhalten der Zug-elemente des Daches (vergleiche Bild 4-7, S. 47).

Bei Dachformen, die Randseile als Auflagerpunkte für die Tragseile vorsehen, ist die Größe der Auflagerkräfte wesentlich von der Lage des Tragseils auf dem Randseil abhängig. An Form (41) (siehe Bild 4-45, S. 79) ist zu erkennen, dass die mittleren Seile sehr viel größere Auflagerpunktverschiebungen aufweisen als die am Rand liegenden. Die beiden äußersten Seile sind ideal unverschieblich gelagert. Entsprechend können sich bei den im mittleren Bereich befindlichen Tragseilen viel größere Durchhänge bei gleichzeitig kleineren Spannweiten ergeben. Als Folge dessen sind die zu übertragenden Seilkräfte deutlich kleiner als bei den beiden äußeren Seilen. Gleiches gilt für die Formen (39), (42), (43) und (53). Die Randseile leiten die Auflagerkräfte der Tragseile zu jeweils zwei Festpunkten weiter, wo sie von einer geeigneten Konstruktion aufgenommen werden müssen.

4.6.4 Krümmung der Dachfläche

Die Betrachtung der Krümmung der erzeugten Formen wird unterteilt in die zwei Hauptrichtungen: in Seillängsrichtung (bei Rotationsflächen radial) und in eine Richtung quer dazu (bei Rotationsflächen entsprechend tangential). In Seillängsrichtung ist die Krümmung des durchhängenden Seils stets negativ. Die Größe der Krümmung ist abhängig von dem Verhältnis des Durchhangs zur Spannweite.

In Querrichtung kann generell unterschieden werden in


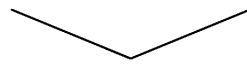

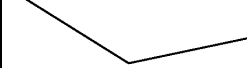

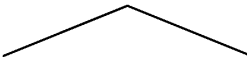

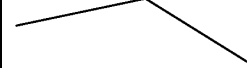
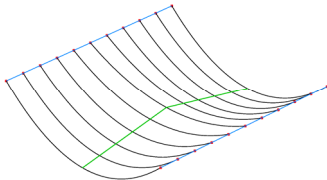
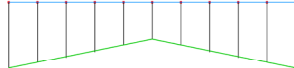
- keine Krümmung
- negative Krümmung (durchhängend)
- positive Krümmung

Ausschlaggebend ist der Verlauf der Verbindungslinie der Tiefpunkte (Tabelle 4-18).

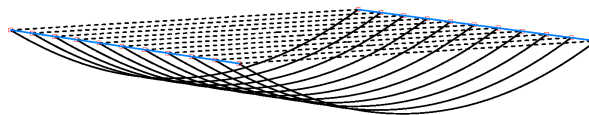
Liegt keine Krümmung in Querrichtung vor, so können die Tiefpunkte mit einer Geraden verbunden werden. Zu diesen Fällen zählen auch Geometrien, bei denen die Verbindungsgerade geneigt verläuft.

Eine negative Krümmung in Querrichtung liegt dann vor, wenn die Verbindungslinie einen Tiefpunkt in der Mitte hat und zu den Seiten hin ansteigt. Diese Linie kann gekrümmt oder auch linear mit Knick sein. Bei einer positiven Krümmung liegt der umgekehrte Fall vor, d. h. die Verbindungslinie fällt zu den Seiten hin ab.

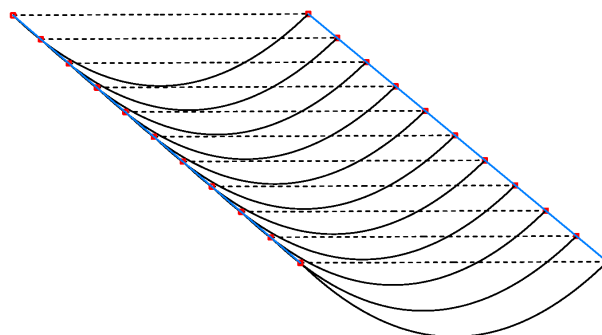
Tabelle 4-18 Schematische Darstellung verschiedener Krümmungen

Quer- krümmung	Form der Verbindungslinie der Tiefpunkte			
	gekrümmt, höhengleich	gradlinig, höhengleich	gekrümmt, geneigt	gradlinig, geneigt
keine	---	—	---	—
negativ				
positiv				
<p>Beispiel Form (22): positive Querkrümmung, gradlinige Verbindungslinie (grün markiert)</p> <p>Isometrie:  Ansicht parallel zur Spannrichtung: </p>				

Formen ohne Krümmung in Querrichtung bilden einseitig gekrümmte Flächen aus. Beispiele mit horizontaler Unterkante sind Form (1), (3), (7) und (8).


Bild 4-28 Einseitig gekrümmte Fläche mit horizontaler Unterkante, Form (1)

Eine Neigung in Querrichtung entsteht, wenn der Verlauf der Auflagerlinien geneigt (Form (2), (4), (23)) oder die Seildurchhänge entsprechend angepasst werden (Form (21), (30), (33), (34)).


Bild 4-29 Einseitig gekrümmte Fläche mit geneigter Unterkante bei geneigten Auflagerlinien, Form (4)

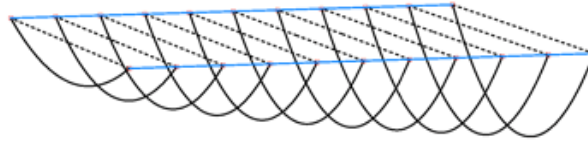


Bild 4-30 Einseitig gekrümmte Fläche mit geneigter Unterkante bei veränderlichem Durchhang, Form (21)

Bei Rotationsflächen besteht eine „einseitige“ Krümmung, wenn in der tangentialen „Querrichtung“, also entlang eines Kreisrings, alle Punkte auf einem ebenen Kreisring liegen. Formen mit dieser Ausbildung sind (5), (9), (10), (16) bis (20). Zu den Formen mit schräger Lage der Tiefpunkte zählen (6), (35), (36).

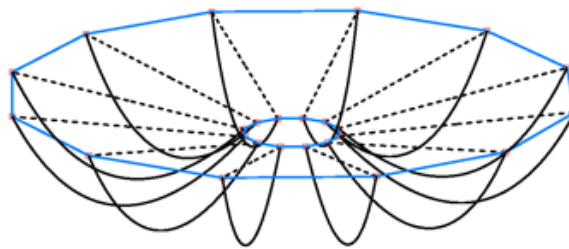


Bild 4-31 Radial gekrümmte Form mit horizontaler Tiefpunktanordnung, Form (18)

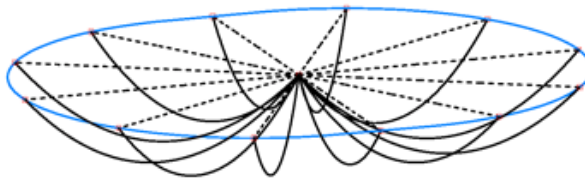


Bild 4-32 Rotationsfläche über ovalem Grundriss mit zwei Tiefpunkten, Form (35)

Die zweite Gruppe umfasst Formen, die nicht nur in Seillängs- sondern auch in Querrichtung eine konkave Krümmung aufweisen. Zu den Figuren mit doppelt negativer Krümmung gehören Form (12) bis (15), (27), (28), (32), (39) bis (41), (50), (51) und (53).

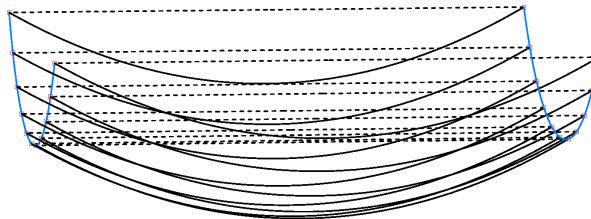


Bild 4-33 Form mit doppelt negativer Krümmung bei durchhängenden Auflagerlinien, Form (12)

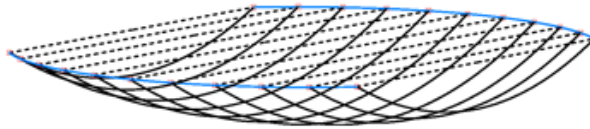


Bild 4-34 Form mit doppelt negativer Krümmung bei veränderlichem Durchhang, Form (27)

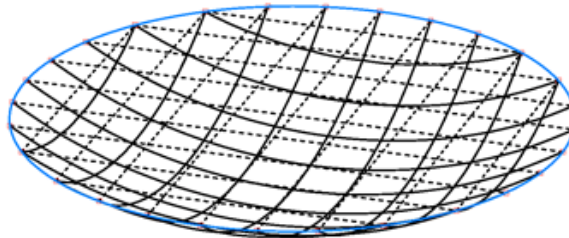


Bild 4-35 Form mit doppelt negativer Krümmung bei umlaufend gehaltenem Rand, Form (50)

In der dritten Gruppe finden sich Formen mit gegensinniger Krümmung, d. h. durchhängend in Seillängsrichtung, aufwölbend quer dazu. Sie sind nicht zu verwechseln mit den unter Kapitel 2.2.3 beschriebenen gegenläufig gekrümmten Dächern, deren Formen auf das Vorspannen der entgegengesetzt gerichteten Trag- und Spannseilscharen zurückgehen. Figuren mit gegensinniger Krümmung sind Form (11), (22), (25), (26), (29), (37) und (38).

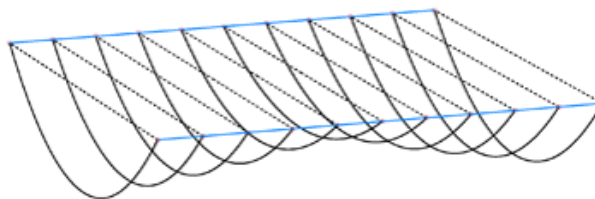


Bild 4-36 Figur mit Gegenkrümmung durch veränderliche Seillängen, Form (22)

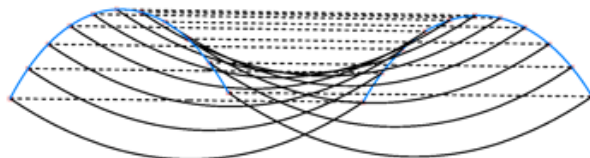
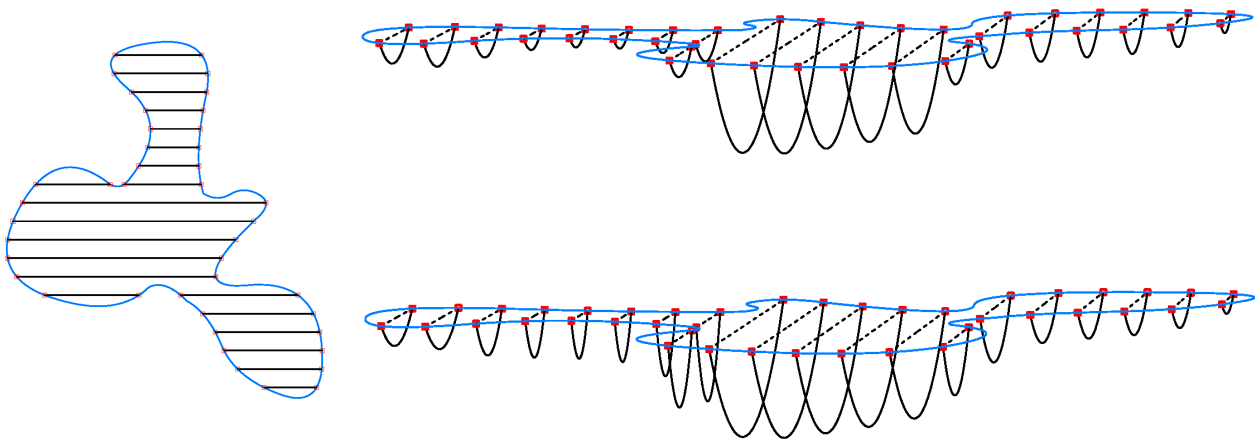


Bild 4-37 Figur mit Gegenkrümmung durch Verlauf der Auflagerlinien, Form (11)

Für die dargestellten freien Formen (31), (42) bis (49) und (52) ergeben sich bei den vorliegenden Seillängen Flächen, die quer zur Spannrichtung der Seile mehrere Neigungswechsel aufweisen. Durch Anpassung der Seillängen können diese Unregelmäßigkeiten teilweise angepasst werden. Form (46) und (47) unterscheiden sich nur durch die Wahl der Seillängen, die in Form (47) ein durchgehendes, wenn auch nicht gleichmäßiges Gefälle zu einem Punkt in der Mitte der Fläche ermöglicht (Bild 4-38).

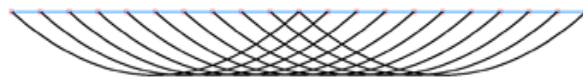
**Bild 4-38 Freie Grundrissform****oben: mit unregelmäßigen Durchhängen, Form (46)****unten: mit zur Mitte zunehmenden Durchhängen, Form (47)**

Die Krümmung der Dachfläche hat direkten Einfluss darauf, wie Wasser und Schnee abgeführt werden bzw. deren Lasten in der statischen Berechnung anzusetzen sind.

Anders als bei steil aufragenden Dachkonstruktionen können sich bei durchhängenden Dachflächen in Mulden und Tiefpunkten Wasser- bzw. Schneesäcke bilden. Es ist daher bei dem Entwurf und der Planung von Hängedächern wichtig, die Dachform so zu gestalten, dass eine effektive Ableitung von Regen- und Schmelzwasser möglich ist.

Die Entwässerung gekrümmter Dachflächen kann über Quergefälle zu einem oder beiden freien Rändern der Längsseiten, bei ausreichendem Längsgefälle über die niedrigere Auflagerlinie oder über Innenentwässerung in einem oder mehreren Tiefpunkten erfolgen. Bei der Ableitung von Regenwasser wird allgemein ein Mindestgefälle von 2 %, aufgrund von Bautoleranzen und Durchbiegungen der Dachhaut besser 5 %, empfohlen.

Ohne eine Querneigung kann das Wasser nicht planmäßig abgeleitet werden. Formen ohne Neigung in Querrichtung sind für Hängedächer daher nur eingeschränkt geeignet, z. B. Form (1), (3), (7) und (17).

**Bild 4-39 Reine Translationsform ohne Querneigung, Form (3) (Seitenansicht)**

Läuft die Tiefpunktlinie auf einen freien Dachrand zu, so kann das Wasser dort von der Dachfläche abfließen. Voraussetzung ist ein ausreichend großes Gefälle, z. B. Form (2), (4), (21), (23), (30), (33) und (34).

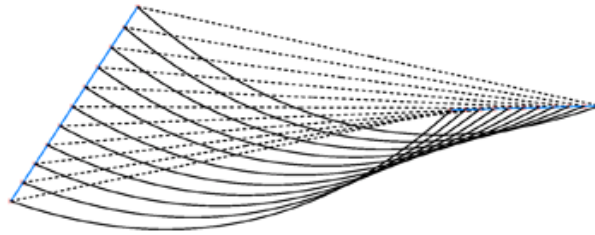


Bild 4-40 Translationsfläche mit einer horizontalen (rechts) und einer nach vorne geneigten Auflagerlinie (links), Form (23)

Die Ableitung von Wasser zum äußeren Rand ist bei einseitig gekrümmten radialen Dächern in der Regel nicht möglich, da die äußeren Ränder meist oberhalb der Dachfläche liegen. Verläuft die Linie der Tiefpunkte horizontal, staut sich das Wasser in dieser Ringmulde, siehe Form (5), (9), (16), (18), (20). Bei Ausbildung eines Gefälles wird das Wasser in einem (Form (36)) oder zwei (Form (35)) Tiefpunkten zusammengeführt, von wo es über eine Innenentwässerung abgeleitet werden kann.

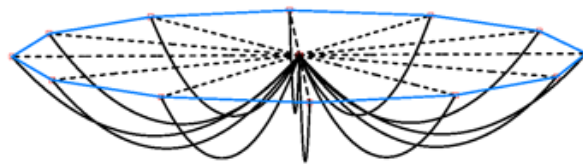


Bild 4-41 Symmetrische Rotationsfigur mit Ringmulde, Form (5)

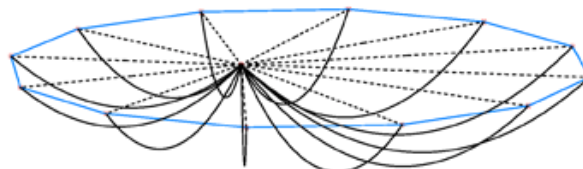


Bild 4-42 Unsymmetrische Rotationsfigur mit einem Tiefpunkt, Form (36)

Eine Besonderheit stellen die Formen (8), (10) und (19) dar. Bei ihnen ist der aus einer Rotation R_y hervorgegangene Höhenunterschied der beiden Auflagerpunkte des Ausgangsseils so groß, dass die Linie der Tiefpunkte mit der Linie der tieferen Auflagerpunkte zusammenfällt (Bild 4-43 und Bild 4-44). Das Wasser kann in diesen Fällen in Seillängsrichtung über den niedrigeren Auflager- rand abfließen.

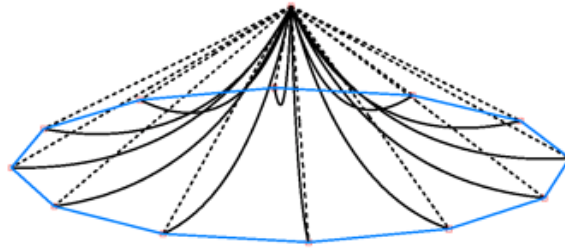


Bild 4-43 Rotationsfigur mit Tiefpunkten am äußeren Auflagerrand, Form (10)

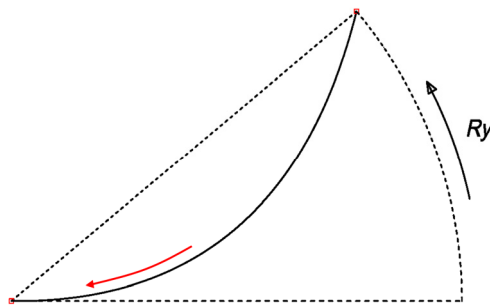


Bild 4-44 Entwässerung in Längsrichtung bei ausreichend großem Gefälle

Dachformen mit doppelt negativer Krümmung bilden eine Mulde in der Dachfläche, in der sich das Wasser sammelt und über eine Innenentwässerung abgeleitet werden kann, siehe Form (12) bis (14), (27), (28), (32), (39) bis (41), (50), (51) und (53). Auch hier ist eine Ausnahme möglich, wenn wie bei Form (15) die Dachfläche so weit gekippt ist, dass das Wasser über den tiefsten Punkt des äußeren Randes gesammelt werden kann.

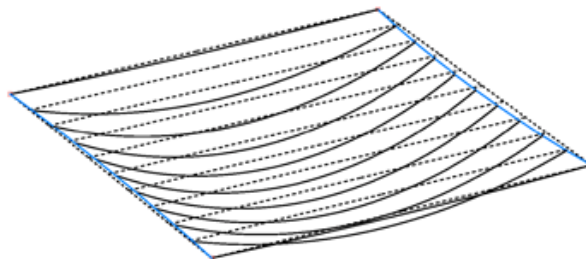


Bild 4-45 Fläche zwischen zwei Randseilen mit Mulde in Dachmitte, Form (41)

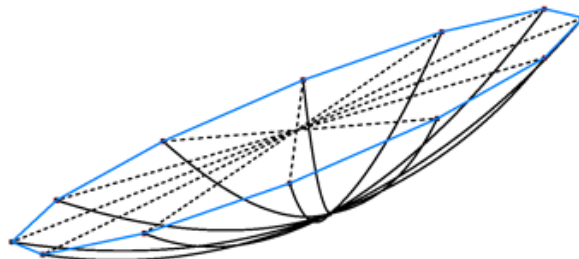


Bild 4-46 Stark geneigte Form mit Tiefpunkt am Rand, Form (15)

Bei Dächern mit gegensinniger Krümmung (Form (11), (22), (25), (26), (29), (37) und (38)) ist aufgrund der konvexen Krümmung in Querrichtung immer eine Entwässerung zu beiden freien Rändern gewährleistet. Es ist entscheidend, dass die Krümmung groß genug ausfällt, damit keine horizontalen Bereiche entstehen, in denen sich das Wasser sammeln könnte.

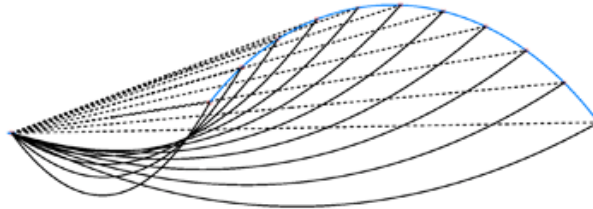


Bild 4-47 Entwässerung zu den freien Längsrändern bei gegensinniger Krümmung der Fläche, Form (38)

Hängedächer über unregelmäßigen Grundrissgeometrien weisen in der Regel keine parallel zur Spannrichtung angeordneten freien Ränder auf, siehe Form (31), (42) bis (49) und (52). Wie auch bei radial gespannten Figuren liegen die Auflagerpunkte meist umlaufend entlang der Ränder, so dass sich dort keine Tiefpunkte einstellen. Die Dachflächen müssen somit über Abläufe entwässert werden, die in der Dachfläche liegen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, über eine geeignete Wahl der Seillängen und damit der Größe der Durchhänge, die Lage und Anzahl der Tiefpunkte zu beeinflussen (vgl. Form (46) und (47) auf S. 77). Eine weitere Lösung besteht darin, die gesamte Dachform so weit zu kippen, dass das Wasser wie bei Form (15) über einen so entstehenden Tiefpunkt am Rand gesammelt werden kann.

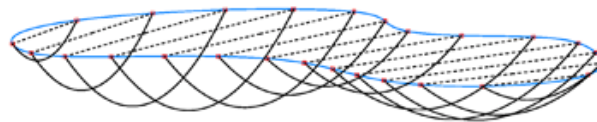


Bild 4-48 Figur über unregelmäßigem Grundriss mit zwei Tiefpunkten im Inneren, Form (45)

4.6.5 Dacheindeckung

Ein bedeutender Vorteil von Hängedächern besteht in der Möglichkeit der einfachen und schnellen Montage der Dacheindeckung (siehe Kapitel 6.2). Die Dacheindeckung wird in vielen Fällen in Form von Fertigteilelementen vorgefertigt und direkt auf den Tragseilen befestigt. Die Fugen zwischen den Einzelelementen müssen entsprechend den Verformungen der Dachfläche im Endzustand sowie während der Montage ausgebildet werden (siehe Kapitel 4.6.6 und 6.2.4).

Fertigungstechnisch sind möglichst einheitliche Elemente mit identischen Abmessungen anzustreben. Jeder Krümmungswechsel erfordert zudem eine veränderte Fugensituation. Besonders einheitliche Geometrien liegen bei Formen vor, die aus einem Ausgangsseil durch gleichmäßige Translationen oder Rotationen generiert werden.

Die Dimensionierung der Dacheindeckung kann vereinheitlicht werden, wenn sie in den überwiegenden Bereichen für konstante Spannweiten und Lasten bemessen werden kann. Da die Dacheindeckung Lasten in der Regel quer zur Seillage abträgt, entspricht die Spannweite dem Abstand

der Seile, d. h. Formen mit paralleler Seilanordnung bieten den Vorteil gleichmäßiger Spannweiten (siehe Bild 4-49).

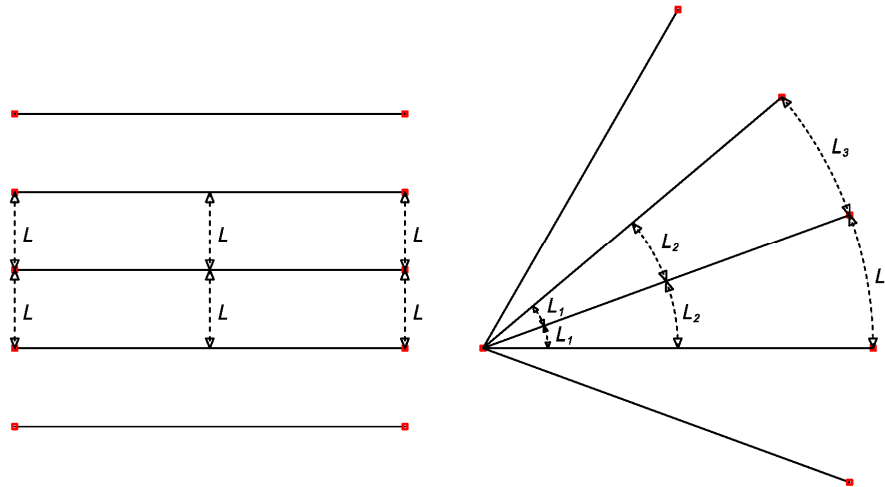


Bild 4-49 Spannweiten der Dacheindeckung

links: konstante Spannweiten bei paralleler Seilanordnung

rechts: linear veränderliche Spannweiten bei radialer Seilanordnung

Radiale Spanngliedarrangierungen weisen diesbezüglich besondere Eigenheiten auf, da die Spannweite in Drehachsennähe gegen Null geht und nach außen stetig linear zunimmt. Die tragenden Teile der Dacheindeckung müssen den statischen Erfordernissen entsprechend abgestuft werden, wenn das Dachgewicht optimieren werden soll.

Aussparungen in der Dacheindeckung werden in der Regel so angeordnet, dass die Tragseile nicht unterbrochen werden. Öffnungen liegen daher zwischen den Seilen oder werden von diesen durchdrungen.

4.6.6 Lastabtragung quer zu den Tragseilen

Das idealisierte Tragwerksmodell, das den untersuchten Formen zu Grunde liegt, basiert auf der Annahme, dass keine Lastableitung quer zur Spannrichtung erfolgt. Dies bedeutet, dass jedes Seil unabhängig von den Nachbarseilen Lasten abträgt und sich dabei entsprechend verformt.

Hängedachflächen bestehen neben den Tragseilen auch aus einer Dacheindeckung, deren tragende Bauteile meist quer zur Seillage verlegt werden (Bild 4-49). Durch die Elemente der Eindeckung stellt sich daher deren Steifigkeit entsprechend eine Kraftübertragung in Querrichtung ein. Hierdurch verringert sich die Verformungsempfindlichkeit der Dachfläche für ungleichmäßig verteilte Nutzlasten.

Schon bei einachsigen gekrümmten Formen kann sich bei ausreichender Steifigkeit der Eindeckung eine Schalentragswirkung einstellen (vergleiche Kapitel 6.3.3). Eine zusätzliche Krümmung in der Querrichtung erhöht bei Verwendung einer ausreichend steifen Dachhaut die Formstabilität der Dachfläche. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Krümmung.

4.6.7 Zwischenunterstützungen

Zwischenunterstützungen entstehen, wenn bei Addition von Einzelflächen zwei geometrisch gleich beschaffene Randauflegerlinien so aneinander stoßen, dass diese Ränder lokale Hochpunkte in der zusammengesetzten Fläche bilden (siehe Bild 4-50). Sie stellen nach dieser Definition Kopplungsbereiche von zwei oder mehreren Einzelhängedachflächen dar, an denen eine gemeinsame Auflagerung erfolgt.

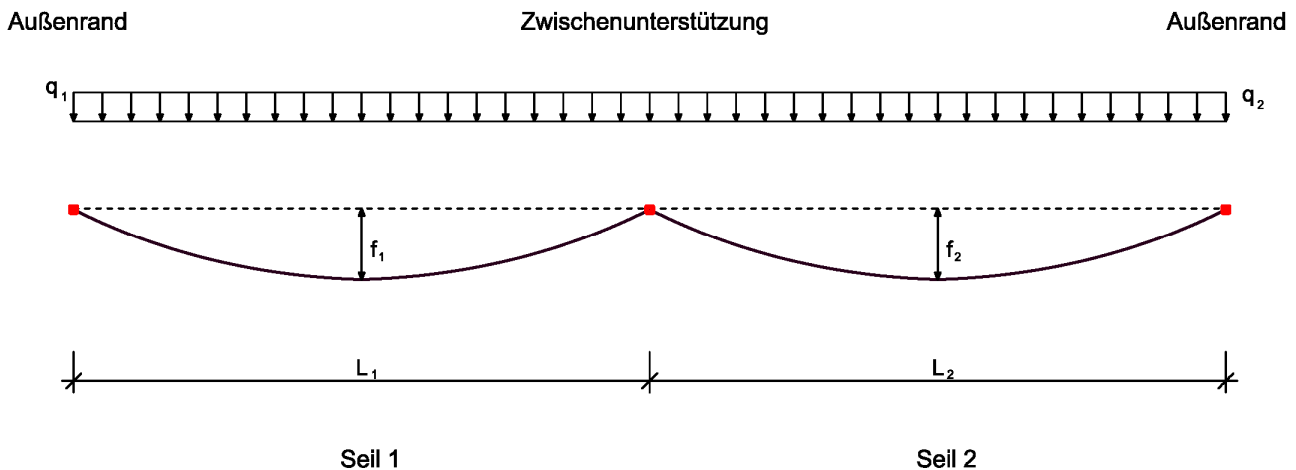


Bild 4-50 Schnitt durch eine zusammengesetzte Hängedachfläche mit Zwischenunterstützung

Die innen liegenden Hochpunkte können genau wie Randaufleger eine Gerade, einen stehenden oder „hängenden“ Bogen, einen Punkt oder einen Kreisring beschreiben (siehe auch Kapitel 5.4.5).

Bei symmetrischen Systemen stoßen an Zwischenunterstützungen die Seile derart aufeinander, dass sich ihre gleich großen und entgegengesetzt gerichteten horizontalen Seilkraftkomponenten gegeneinander aufheben (Bild 4-51). Die vertikalen Kraftkomponenten addieren sich an der Stützung zu einer resultierenden Vertikalkraft. Die Mittelstützung muss in diesem Fall bei gleichmäßiger Belastung nur vertikale Lasten abtragen.

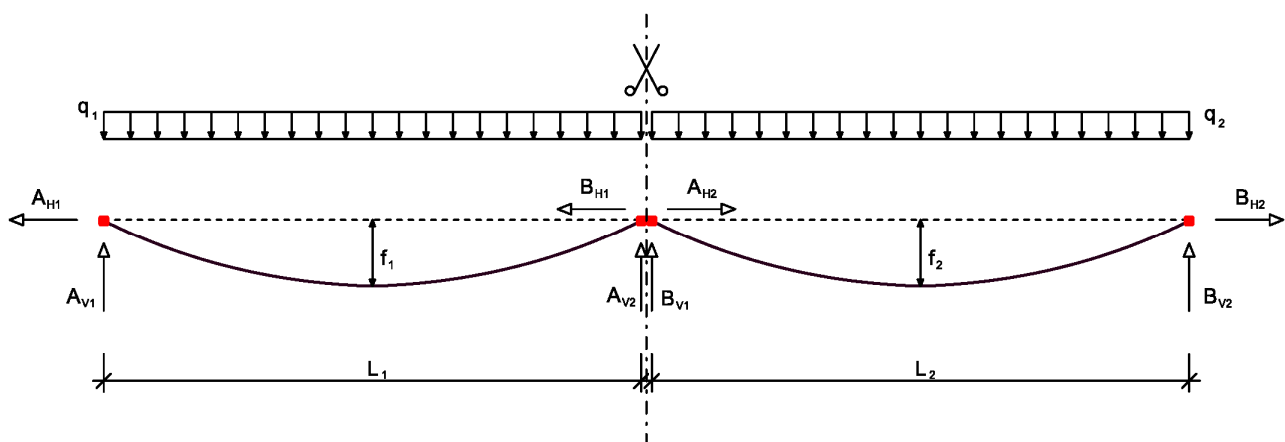


Bild 4-51 Auflagerkräfte an Rand- und Mittelauflagern
(für $f_1 = f_2$, $L_1 = L_2$ und $q_1 = q_2$ ergibt sich $A_{H2} = B_{H1}$)

Treffen an der Zwischenunterstützung zwei Seile mit unterschiedlich großen Seilkräften aufeinander, so sind an der Mittelstützung neben den addierten vertikalen Auflagerkräften auch die Differenz-Horizontalkräfte aufzunehmen.

Die Form (20) entsteht durch Addition von zwei Formen (1) und zwei Halbkreisen aus (5). Die Mittelunterstützung ist geradlinig, wobei die Halbkreise an die gegenüberliegenden Endpunkte anschließen (Bild 4-52). Durch die doppelte Symmetrie des Systems heben sich die Horizontalkräfte im Inneren gegeneinander auf, an der Mittelstützung verbleiben nur resultierende Vertikalkräfte.

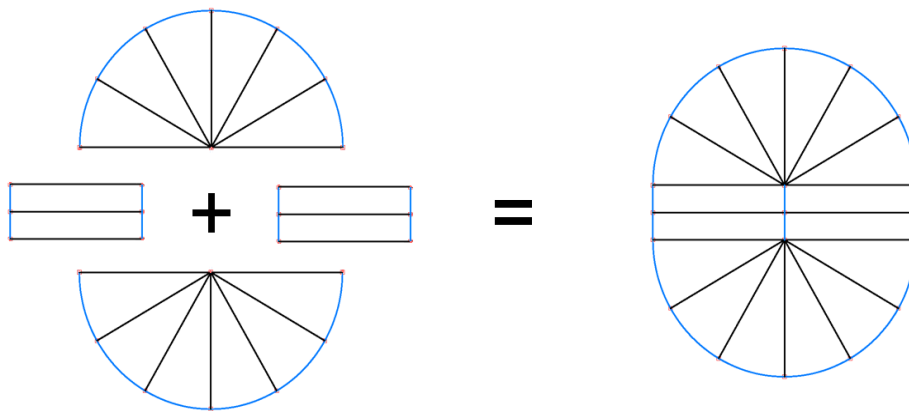


Bild 4-52 Addition von Einzelflächen zu einer Gesamtfigur, Form (20) (Draufsicht)

4.7 Modifikation von Hängedachformen

Hängedachformen, die mit der vorgestellten Methodik entworfen wurden, können im weiteren Planungsprozess durch Modifikationen an geänderte Randbedingungen angepasst werden. Mit der gezielten Modifikation der Hängedachform kann erreicht werden, dass von den erwünschten Entwurfskriterien, z. B. der Dachform, trotz Anpassung anderer Merkmale nicht abgewichen werden muss. Nachfolgend werden die Modifikationsmöglichkeiten zunächst an Einzelseilen aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Maßnahmen und ihrer Auswirkungen an der gesamten Hängedachform an verschiedenen Beispielen.

4.7.1 Modifikationsmöglichkeiten

Bei der Modifikation der Hängeform von Einzelseilen steht nur eine begrenzte Anzahl von Variablen zur Verfügung. Daher eignet sich diese Betrachtung als Grundlage für die später erläuterten Modifikationsmöglichkeiten von Hängedachformen.

Bei Einzelseilen kann in untereinander abhängige und unabhängige Parameter unterschieden werden. Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Seilparametern Spannweite L , Seillänge L_s und Durchhang f . Vereinfachend kann unter der Voraussetzung eines ideal dehnstarren Seils folgende Gleichung zur Beschreibung der Abhängigkeit genutzt werden:

$$f = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot (L_s - L) \cdot L}$$

Eine Vergrößerung der Spannweite L unter Beibehaltung eines konstanten Durchhangs f ist nur unter Vergrößerung der Seillänge L_s möglich (siehe Bild 4-53).

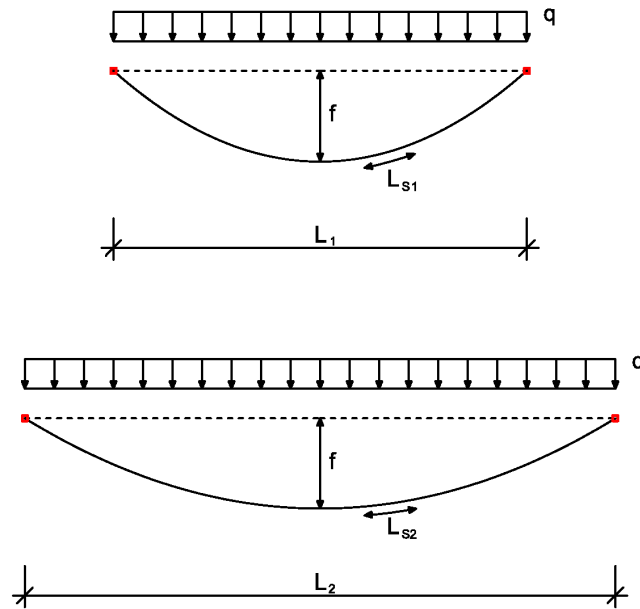


Bild 4-53 Zusammenhang zwischen Spannweite und Seillänge bei konstantem Durchhang

Ebenso bewirkt eine Verkleinerung der Seillänge L_s bei konstanter Spannweite L eine Verkleinerung des Durchhangs f (siehe Bild 4-54).

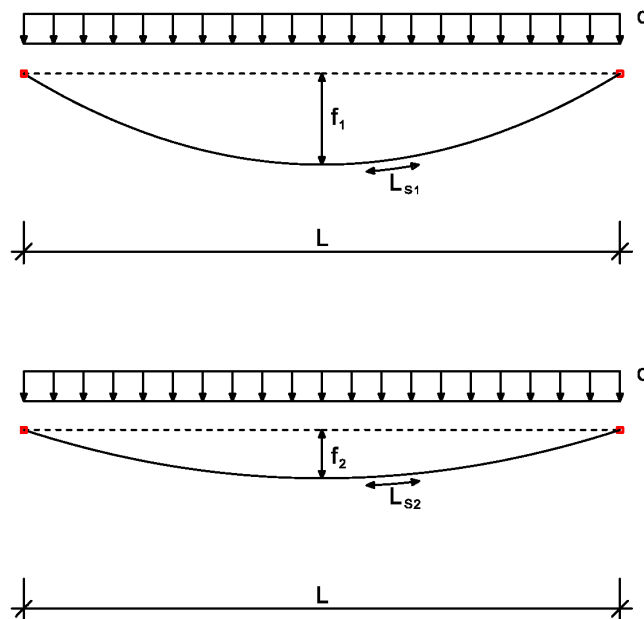


Bild 4-54 Zusammenhang zwischen Seillänge und Durchhang bei konstanter Spannweite

Weiterhin stellt sich durch eine Verkleinerung der Spannweite L bei konstanter Seillänge L_s ein größerer Durchhang f ein (siehe Bild 4-55).

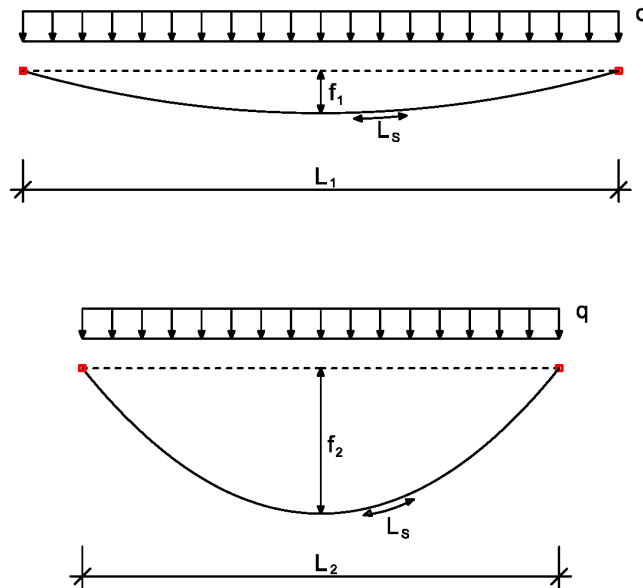


Bild 4-55 Zusammenhang zwischen Spannweite und Durchhang bei konstanter Seillänge

Zu den unabhängigen Parametern, die Einfluss auf die Hängeform haben, zählen die Größe und Verteilung der Belastung auf dem Tragseil. Die Dachlast ist in der Regel durch äußere Randbedingungen vorgegeben. Der auf das betrachtete Seil entfallende Anteil kann über den gegenseitigen Abstand und die damit beeinflussbare Lasteinzugsbreite gesteuert werden.

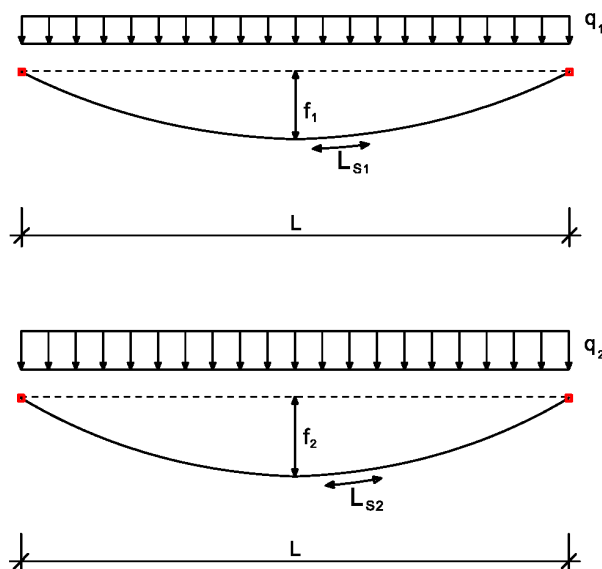


Bild 4-56 Zusammenhang zwischen Last und Durchhang bei elastischem Materialverhalten

Bei Seilen mit unterschiedlich großer Gleichstreckenlast erhöht sich der Durchhang infolge einer vergrößerten elastischen Seildehnung (siehe Bild 4-56). Da die Seildehnungen üblicherweise gering

sind, kann die gleiche Formänderung einfacher durch eine planmäßige Seilverlängerung erzielt werden.

Durch die Veränderung des Höhenunterschieds der Auflagerpunkte sind Modifikationen der Hängeform möglich, die über die Auswirkungen der bisher betrachteten Parameter hinausgehen. Unter Annahme gleich hoher Auflagerpunkte verbleibt der Tiefpunkt stets in der Spannweitenmitte. Bei Vorgabe eines Höhenunterschiedes verschiebt sich der Tiefpunkt der Durchhangfigur in Richtung des niedrigeren Auflagers. Die Symmetrie der Form wird aufgehoben (siehe Bild 4-57).

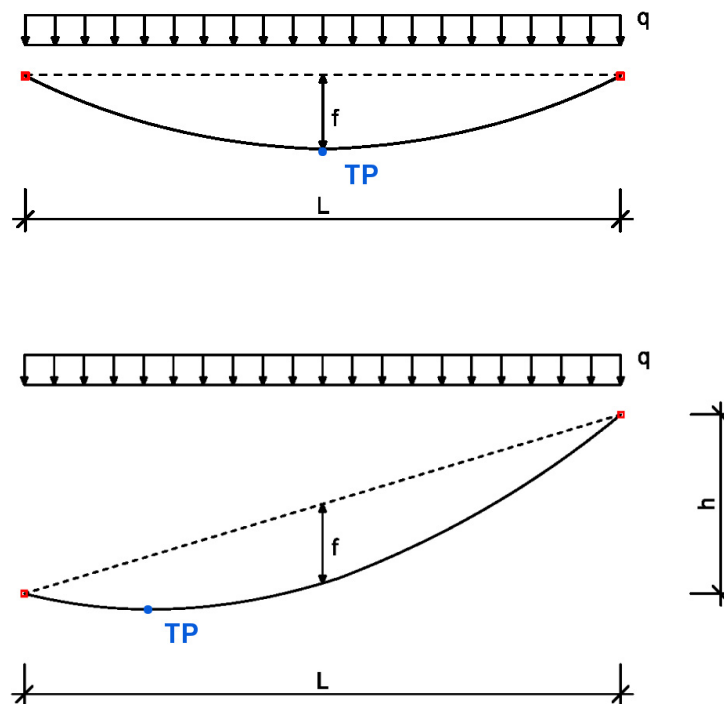


Bild 4-57 Seile mit unterschiedlichen Auflagerhöhen bei gleichen Spannweiten

Die Beurteilung der betrachteten Modifikationsmöglichkeiten mit Hilfe der in Kapitel 4.6.1 vorgestellten Kriterien ist in Tabelle 4-19 zunächst für ein Einzelseil zusammengefasst. Die Definitionen von „links“ und „rechts“ sind dabei analog zu der Darstellung in Bild 4-57 gewählt, bei der das rechte Auflager höher angeordnet ist.

Da sich die obigen Beurteilungen auf ein einzelnes Seil, also eine zweidimensionale Konstruktion beziehen, können alle Kriterien, die dreidimensionale Dachflächen betreffen, wie z. B. Betrachtungen zu den Rändern, nicht genutzt werden. Das Kriterium der Grundrissform reduziert sich beim Einzelseil auf die Spannweite, Krümmungen können nur entlang der Haupttragrichtung benannt werden.

Tabelle 4-19 Beurteilung der Modifikationsmöglichkeiten

	Spannweite größer Durchhang konstant Seillänge größer	Spannweite konstant Durchhang größer Seillänge größer	Spannweite kleiner Durchhang größer Seillänge konstant	Last größer Durchhang größer	Höhenunterschied der Auflagerpunkte größer
Lastabtragung / Kräfteverlauf					
Zuggliedanordnung	–	–	–	–	–
Größe der Seilkräfte	↑	↓	↓	↑	↓ ↑
Verschieblichkeit der Auflagerpunkte	–	–	–	–	–
Dachform					
Grundrissform	↑	–	↓	–	–
Krümmung der Dachfläche	↓	↑	↑	↑	↑ ↓
Verlauf der Verbindungslinie der Tiefpunkte	–	–	–	–	←
Form der Auflagerlinien	–	–	–	–	–
Einlaufwinkel an den Auflagerpunkten	↓	↑	↑	↑	↓ ↑
Ausbildung der freien Ränder	–	–	–	–	–

↑	wird größer
↓	wird kleiner
↑ ↓	wird links größer, rechts kleiner
↓ ↑	wird links kleiner, rechts größer
←	wandert nach links
–	hat keinen Einfluss

Im Folgenden werden die beschriebenen Maßnahmen vom einzelnen Seil auf die flächige Hängedachform erweitert, die aus einer Reihung vieler Einzelseile besteht. Hierbei kann die Modifikation auf alle oder nur auf einzelne Seile angewendet werden. Darüber hinaus können innerhalb einer Hängedachform unterschiedliche Anpassungsmöglichkeiten zum Einsatz kommen. Über die vielfältigen Varianten lassen sich verschiedene Entwürfe von Hängedachformen mit unterschiedlichen Konstruktionen erzeugen.

4.7.2 Modifikationen an ausgewählten Beispielen

Beispiel A

Die Ausgangsform A (Bild 4-58) des ersten Beispiels entspricht der Figur (1) des Formenkatalogs aus Kapitel 4.5 (siehe Tabelle 4-1, S. 52).

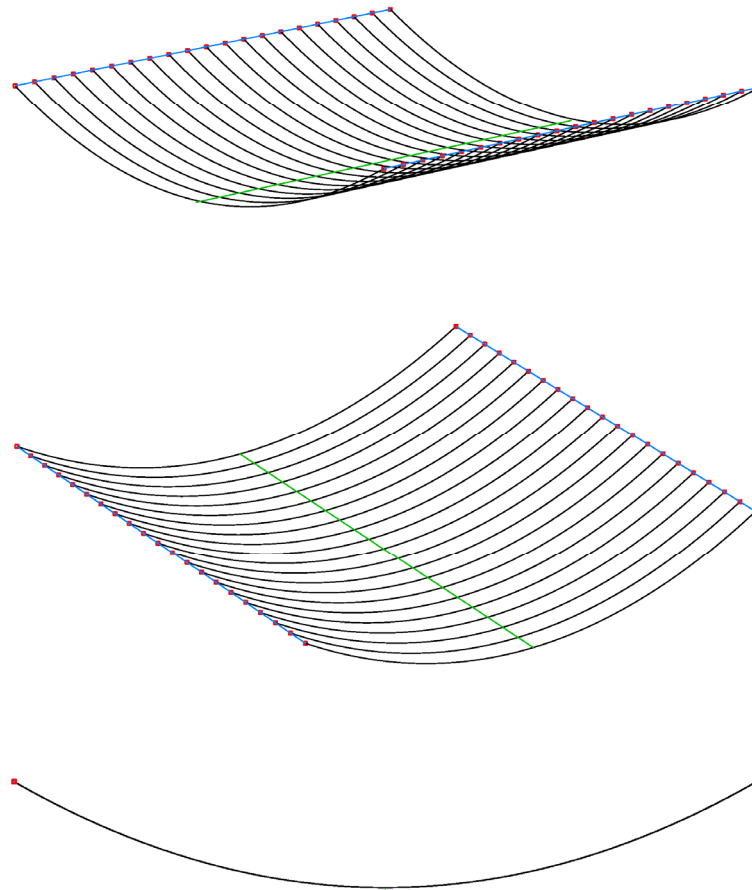


Bild 4-58 Ausgangsform A: Isometrien und Längsansicht

Die Hängeform überspannt eine rechteckige Grundfläche. Sie entsteht durch wiederholte Translation eines Einzelseils rechtwinklig zur Seilebene. Die geometrisch gleichen Seillinien sind parallel zueinander angeordnet und erzeugen eine einfach negativ gekrümmte Dachfläche mit einer horizontalen Tiefpunktlinie in Spannweitenmitte. Die Auflagerlinien sind rechtwinklig zu den Seilebenen, gerade, horizontal und höhengleich.

Ziel der Modifikation ist, die Form derart zu verändern, dass z. B. zur gezielten Dachentwässerung zu einer der Längsseiten eine gleichmäßige Querneigung erzeugt wird. Die Tiefpunktlinie soll sich mit konstanter Neigung einstellen (vergleiche Tabelle 4-18, S. 74).

Bei der Modifikation A1 erfolgt die schrittweise Anpassung des Durchhangs bei konstanter Spannweite durch eine entsprechende Vergrößerung der Seillängen (siehe Bild 4-59). Die Auflagerpunkte bleiben dabei unverändert.

Bei der Modifikation A2 wird die Querneigung durch eine Neigung der Auflagerlinien bei unveränderten Seillinien erzielt (siehe Bild 4-60).

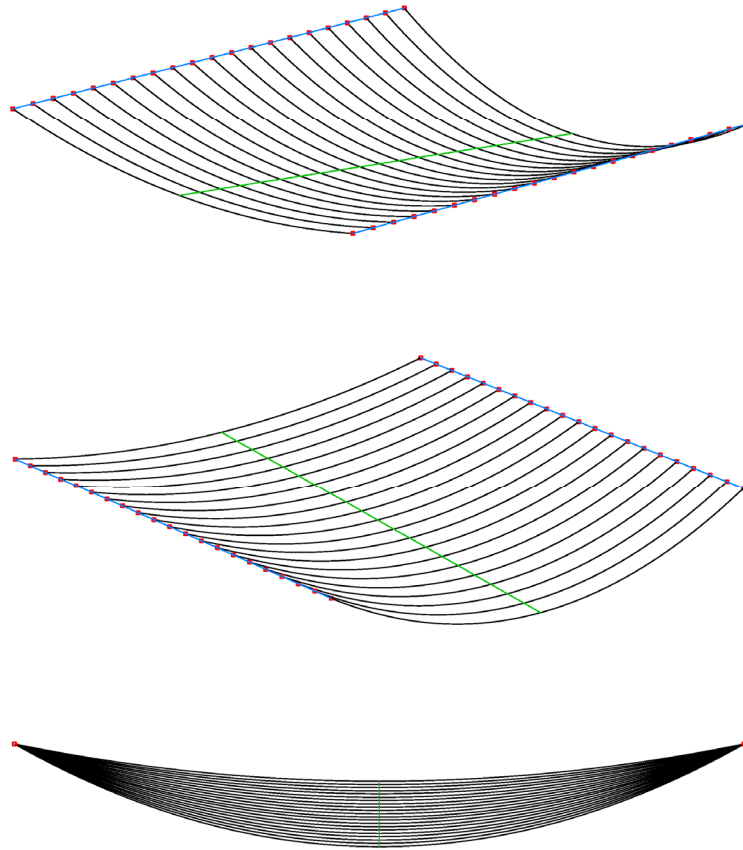


Bild 4-59 Modifikation A1: Isometrien und Längsansicht

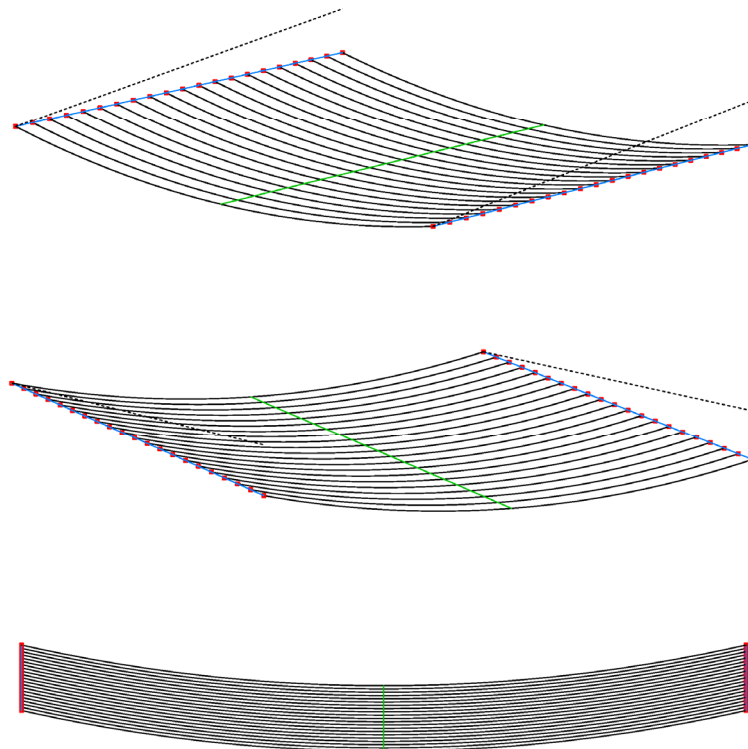


Bild 4-60 Modifikation A2: Isometrien und Längsansicht

In der folgenden Tabelle werden die durchgeführten Modifikationen A1 und A2 mit der Ausgangsform A verglichen. Hierzu kommen die in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Bewertungskriterien bezüglich der Lastabtragung und der Dachform zur Anwendung.

Tabelle 4-20 Vergleich der Modifikationen (Betrachtung vom hohen zum tiefen Längsrand)

	Ausgangsform A	Modifikation A1	Modifikation A2
Lastabtragung / Kräfteverlauf			
Zuggliedanordnung	parallel	parallel	parallel
Größe der Seilkräfte	konstant	abnehmend	konstant
Verschieblichkeit der Auflagerpunkte	starr	starr	starr
Dachform			
Grundrissform	rechteckig	rechteckig	rechteckig
Krümmung der Dachfläche	einfach negativ	einfach negativ	einfach negativ
Verlauf der Tiefpunktlinie	gradlinig, horizontal	gradlinig, abfallend	gradlinig, abfallend
Form der Auflagerlinien	gradlinig, horizontal	gradlinig, horizontal	gradlinig, abfallend
Einlaufwinkel an den Auflagerpunkten	konstant	zunehmend	konstant
Ausbildung der freien Ränder	gleich	unterschiedlich	bis auf Höhe gleich

Die Auswertung verdeutlicht, dass die gewünschte Veränderung der Dachform im vorliegenden Fall durch geringe Anpassungen der Form der Auflagerlinie bzw. der Seillänge erreicht werden konnte. Beide Varianten der Ausgangsform A sind entsprechend des Kriterienkatalogs annähernd gleichwertige Lösungen der Zielsetzung.

Eine über die Tabelle hinausgehende Beurteilung der Varianten hinsichtlich baupraktischer Aspekte und Auswirkungen auf die Gesamtkonstruktion zeigt Unterschiede, deren Gewichtung nur im Einzelfall bewertet werden kann.

Die Modifikation A1 erfordert die Ausführung unterschiedlicher Seillängen bei gleichen Auflagerhöhen. Die Auflagerkräfte der Seile werden in konstanter Höhenlage übertragen, so dass die lastweiterleitenden Konstruktionen entlang der Stirnseiten gleichförmig ausgeführt werden können.

Bei der Modifikation A2 ergeben sich aus den unveränderten Seillinien Vorteile hinsichtlich der Einheitlichkeit der Haupttragglieder und der Ausbildung der Dacheindeckung. Zusätzlich weisen die freien Längsränder eine identische Form auf, die bei der Gestaltung der Längsseiten genutzt werden kann.

Beispiel B

In einem weiteren untersuchten Beispiel besteht die Ausgangsform B aus einer doppelt negativ gekrümmten Form über ovalem Grundriss mit geschlossenem Rand. Die Seile spannen über die Langseite (siehe Bild 4-61).

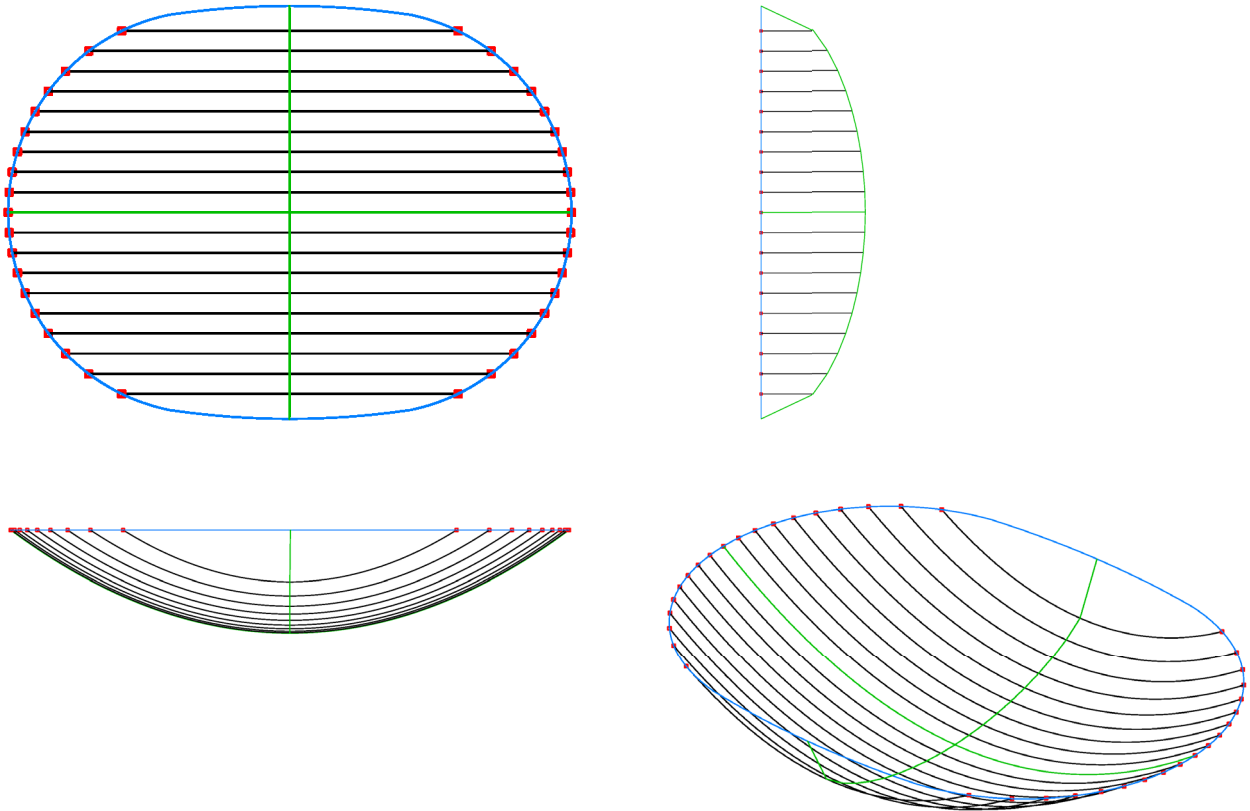


Bild 4-61 Ausgangsform B: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie

Die Modifikation der Dachform erfolgt mit dem Ziel, andere Möglichkeiten der Lastabtragung aufzuzeigen, bei denen die Ausgangsform weitgehend beibehalten wird.

Durch eine Drehung der Spannrichtung der Seile wird bei der Modifikation B1 die Konstruktion so verändert, dass die Seile über die Kurzseite geführt werden (siehe Bild 4-62). Um bei kleinerer Spannweite den gleichen Durchhang wie in der Ausgangsform B zu erzielen, müssen zusätzlich die Seillängen verringert werden. Bei unverändertem Seilabstand ergibt sich aus der vergrößerten Breite quer zur Spannrichtung eine größere Seilanzahl. Die Auflagerpunkte ordnen sich auf den Längsseiten des ovalen Rands an.

Bei der Modifikation B2 werden der geschlossene Rand aufgelöst und die Auflagerpunkte auf zwei parallele Linien verschoben, so dass sich für alle Seile in Bezug auf die Ausgangsform eine mittlere Spannweite einstellt (siehe Bild 4-63). Zur Beibehaltung der doppelt negativ gekrümmten Dachform ist eine entsprechende Verlängerung bzw. Verkürzung der Seile erforderlich.

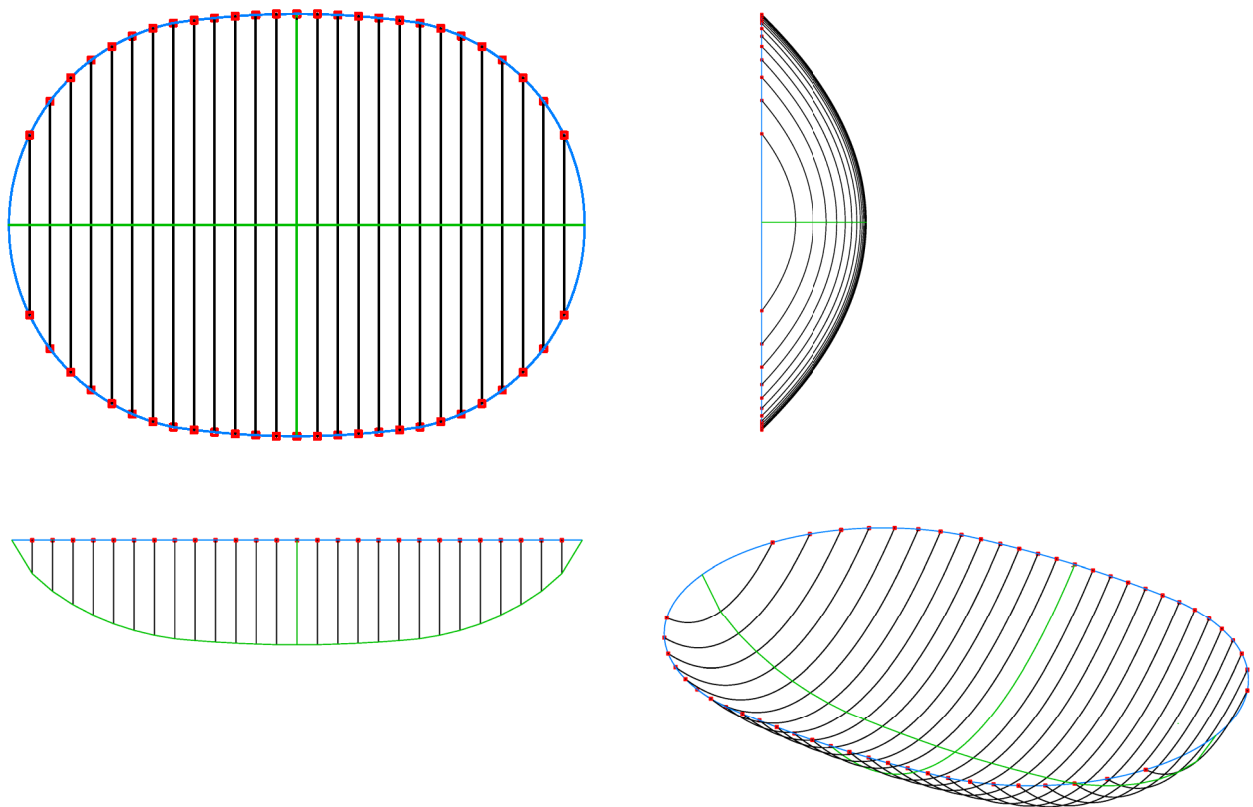


Bild 4-62 Modifikation B1: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie

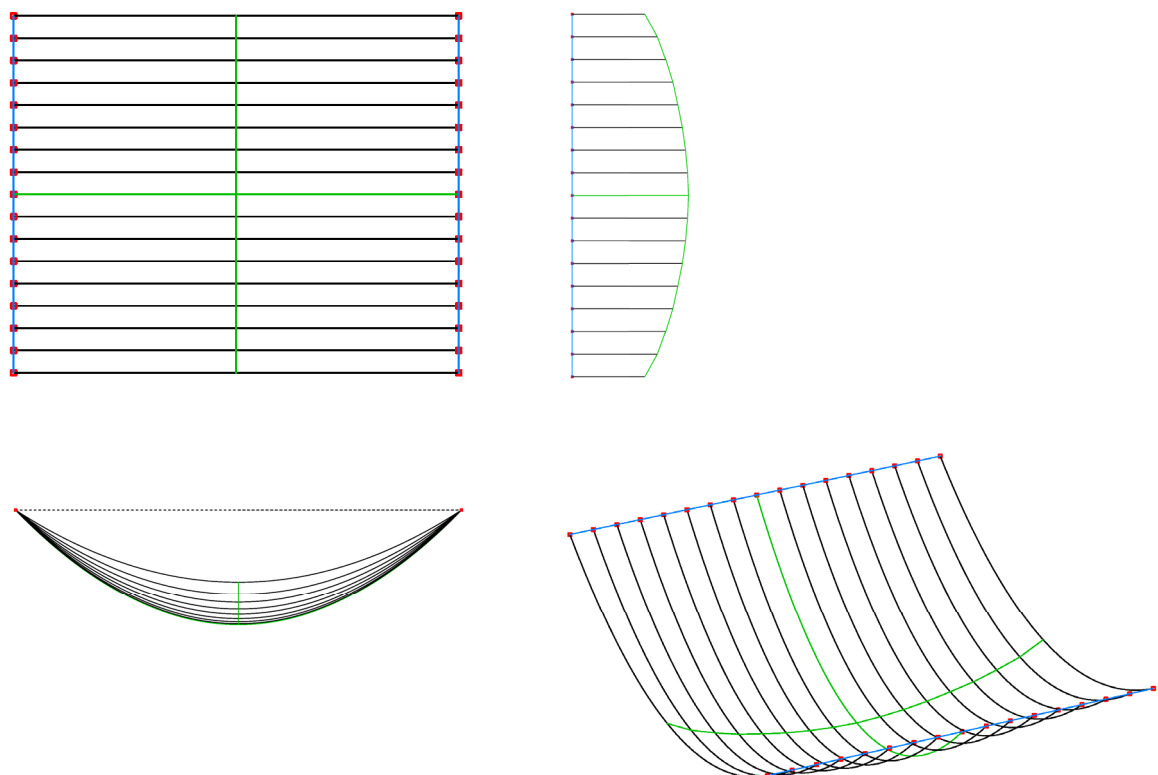


Bild 4-63 Modifikation B2: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie

Die Bewertung der Ausgangsform B und der beiden Modifikationen B1 und B2 erfolgt wiederum tabellarisch.

Tabelle 4-21 Vergleich der Modifikationen (Betrachtung von der Mitte zu den Längsrändern)

	Ausgangsform B	Modifikation B1	Modifikation B2
Lastabtragung / Kräfteverlauf			
Zuggliedanordnung	parallel	parallel	parallel
Größe der Seilkräfte	abnehmend	abnehmend	zunehmend
Verschieblichkeit der Auflagerpunkte	starr	starr	starr
Dachform			
Grundrissform	oval	oval	rechteckig
Krümmung der Dachfläche	doppelt negativ	doppelt negativ	doppelt negativ
Verlauf der Tiefpunktlinie	negativ gekrümmt	negativ gekrümmt	negativ gekrümmt
Form der Auflagerlinien	stark gekrümmt, horizontal	leicht gekrümmt, horizontal	gradlinig, horizontal
Einlaufwinkel an den Auflagerpunkten	abnehmend	abnehmend	abnehmend
Ausbildung der freien Ränder	keine	keine	gleich

Trotz starker Veränderungen der Konstruktionen zeigt der Kriterienkatalog, dass die Krümmung der Dachfläche und der Tiefpunktlinienverlauf bei den Modifikationen beibehalten werden. Der Vergleich der weiteren Kriterien zeigt, dass durch die Nutzung sowohl der gleichen Rand- als auch Grundrissform die Modifikation B1 stärkere Ähnlichkeiten zur Ausgangsform B behält.

Die Modifikation B2 verwendet eine stark abweichende Auflagerliniengeometrie, die zu einem rechteckigen Grundriss führt. Der Kriterienkatalog zeigt, dass die entstandene Dachform eine Mischkonstruktion der Ausgangsformen A und B darstellt. Zur Wahrung der Dachform müssen die Durchhänge in Richtung der Längsseiten abnehmen, was folglich zu anwachsenden Seilkräften führt. Abweichend nimmt die Größe der Seilkräfte bei der Ausgangsform B und der Modifikation B1 trotz verringertem Durchhang ab, da die Spannweitenreduktion die Seilkräfte überproportional beeinflusst.

Über die Bewertungskriterien hinaus ergibt sich bei den geschlossenen Rändern der Ausgangsform B und der Modifikation B1 die Möglichkeit, die Auflagerkräfte mit Hilfe eines Ringträgers kurzzuschließen. Aufgrund der deutlichen Längenunterschiede der Seile der Dachfläche mit kurzen Seillängen an den Längsrändern ergibt sich zudem ein günstigeres Tragverhalten unter dynamischen Beanspruchungen, da alle Tragelemente unterschiedliche Eigenfrequenzen aufweisen und sich eine gegenseitige Dämpfung einstellen kann.

Beispiel C

Das dritte Beispiel basiert auf der Figur (37) des Formenkatalogs (siehe Tabelle 4-14, S. 61).

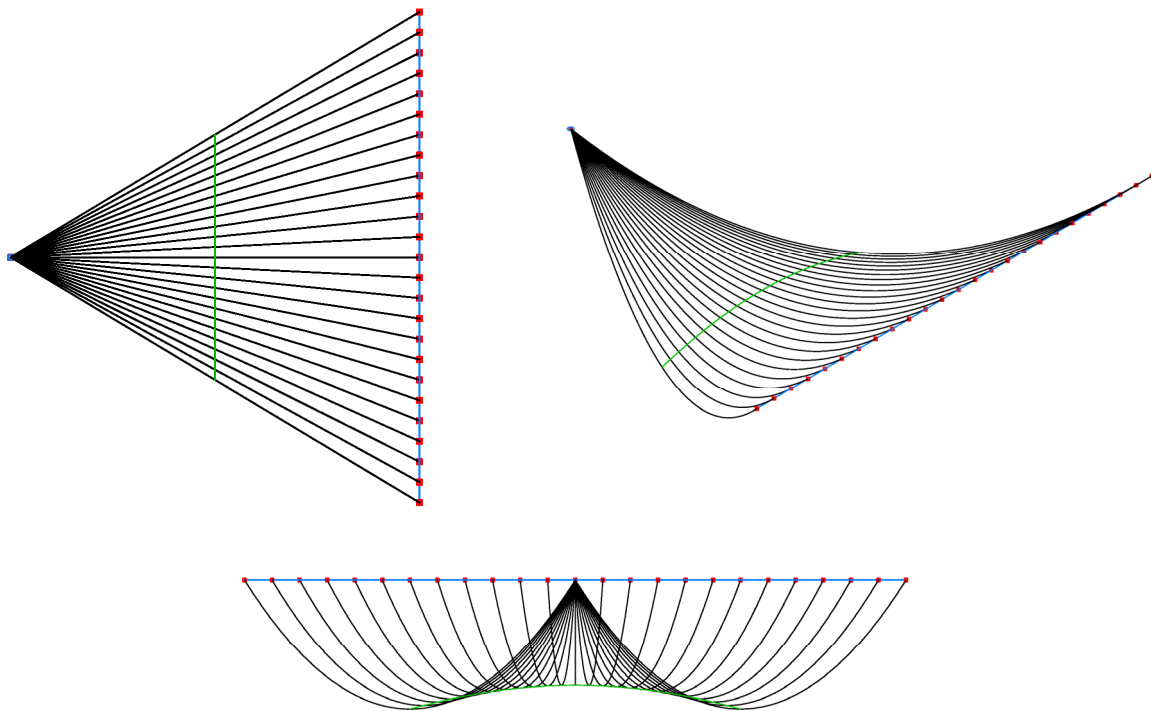


Bild 4-64 Ausgangsform C: Draufsicht, Isometrie und Queransicht

Die durch Rotationen erzeugte Ausgangsform C (siehe Bild 4-64) überspannt eine dreieckige Grundfläche. Die Seillinien laufen, ausgehend von einem gemeinsamen Auflagerpunkt, radial bis zu einer Geraden, auf der die Auflagerpunkte höhengleich angeordnet sind. Die somit erzeugte Form ist hier doppelt negativ gekrümmt mit Tiefpunkten an den Längsseiten und einfach symmetrisch.

Bei den folgenden Modifikationen wird der zentrale Auflagerpunkt mit den Seilrichtungen im Grundriss beibehalten und ausschließlich die Auflagerbedingungen am abliegenden Seilende variiert.

Bei der Modifikation C1 werden die Tragseile an einem Randseil verankert, das zwischen den äußersten Endpunkten spannt und das somit quer zu seiner Achse durch die angreifenden Seilkräfte ausgelenkt wird (siehe Bild 4-65). Dadurch erhält jedes Seil eine unterschiedlich nachgiebige Auflagerung, deren Verformung in der Mitte des Randseils am größten ist.

Bei der Modifikation C2 werden die starren Auflagerpunkte nicht entlang einer höhengleichen Geraden, sondern entlang eines stehenden Bogens angeordnet (siehe Bild 4-66).

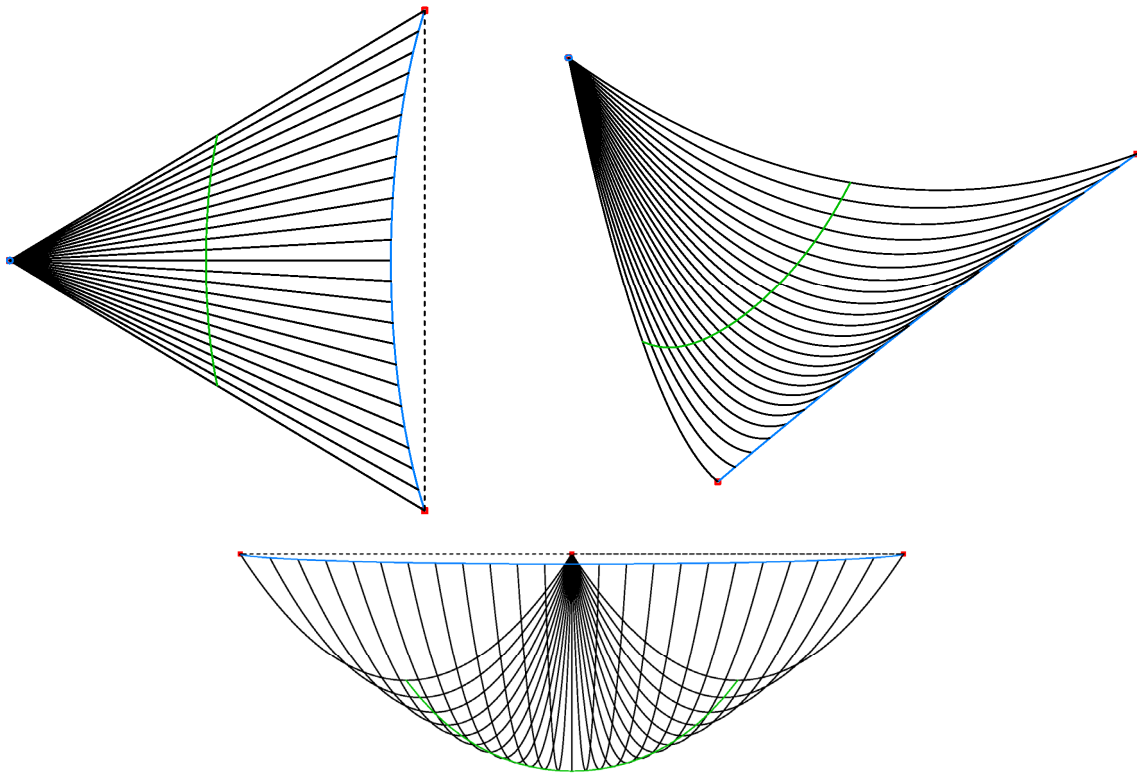


Bild 4-65 Modifikation C1: Draufsicht, Isometrie und Queransicht

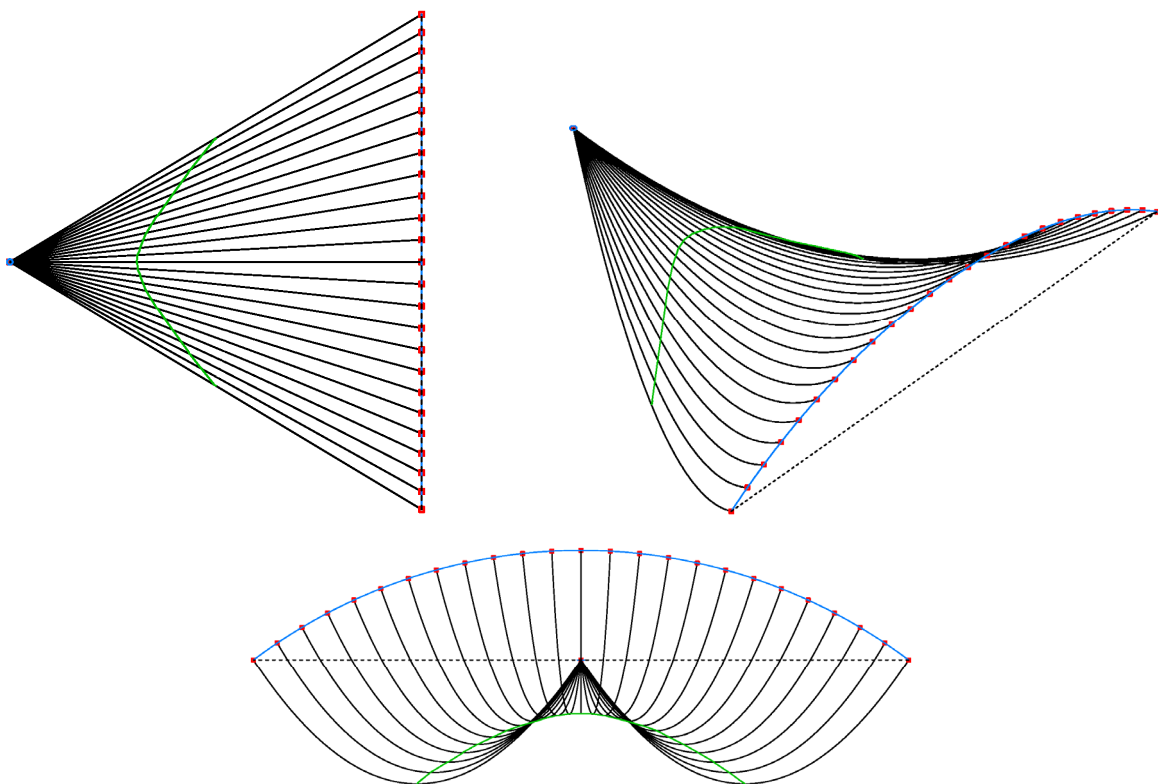


Bild 4-66 Modifikation C2: Draufsicht, Isometrie und Queransicht

Die folgende Tabelle zeigt vergleichend die Bewertung der durchgeführten Modifikationen mit der Ausgangsform.

Tabelle 4-22 Vergleich der Modifikationen (Betrachtung von der Mitte zu den Rändern)

	Ausgangsform C	Modifikation C1	Modifikation C2
Lastabtragung / Kräfteverlauf			
Zuggliedanordnung	radial	radial	radial
Größe der Seilkräfte	zunehmend	zunehmend	zunehmend
Verschieblichkeit der Auflagerpunkte	starr	elastisch	starr
Dachform			
Grundrissform	dreieckig	dreieckig	dreieckig
Krümmung der Dachfläche	gegensinnig	doppelt negativ	gegensinnig
Verlauf der Tiefpunktlinie	positiv gekrümmt	negativ gekrümmt	positiv gekrümmt
Form der Auflagerlinien	gradlinig, horizontal	gekrümmt, ~ horizontal	nach oben gebogen
Einlaufwinkel an den Auflagerpunkten	zunehmend	abnehmend	abnehmend
Ausbildung der freien Ränder	gleich	gleich	gleich

Die Bewertungskriterien verdeutlichen, dass die vertikale Verschiebung der starren Auflagerpunkte bei der Modifikation C2 nur zu geringen Abweichungen der Lastabtragung und der Dachform führt. Im Gegensatz dazu beeinflusst die horizontale Verschieblichkeit der Auflagerlinie in Modifikation C1 die Dachform wesentlich stärker. Aus der ursprünglich gegensinnig gekrümmten Dachfläche entsteht so eine Dachform mit doppelt negativer Krümmung mit einem Tiefpunkt in Flächenmitte.

Die Tiefpunktlinie der Modifikation C2 verschiebt sich zum tiefer gelegenen zentralen Auflagerpunkt und weist im Vergleich zur Ausgangsform C eine deutlich stärkere Krümmung auf.

Aus den Modifikationen an der Stirnseite der Dachfläche ergeben sich Konsequenzen für die Ausbildung der lastweiterleitenden Konstruktion. Bei der Modifikation C1 werden die Lagerkräfte an den beiden Endpunkten des Randseils konzentriert. Im Gegensatz zur Ausgangsform C sind bei der Modifikation C2 die Dachlasten in unterschiedlichen Höhenlagen aufzunehmen und weiterzuleiten.

4.8 Schlussfolgerungen

Durch die Kombination frei hängender Zuelemente (Seile) können Hängedachflächen generiert werden. Dazu werden Seile, ausgehend von einem Einzelseil, durch Vervielfältigung und anschließende Translationen und / oder Rotationen aneinander gereiht, so dass Hängedachflächen aufgespannt werden. Weiterhin können die neu geschaffenen Seile durch Anpassung des Seildurchhangs, der Spannweite oder der Auflagerbedingungen im Vergleich zum Ausgangsseil verändert werden.

Auf Basis dieser Formfindungsmethodik liefern numerische Berechnungen eine Vielzahl unterschiedlichster Dachformen, die in einem Formenkatalog zusammengefasst sind. Die Analyse der untersuchten Formen zeigt eine enge Verknüpfung der Zuggliedanordnung mit der resultierenden

Dachform und Krümmung der Dachfläche. Die Dachgeometrie hat Auswirkungen auf die Auflagerkräfte, die mittels der unterstützenden Konstruktionen abzuleiten sind. Die Dachkrümmung bestimmt wesentlich die Art und Ausbildung der Dachdeckung sowie die Entwässerung der Hängedachfläche.

Die Analyse und Bewertung der aus Einzelseilen gebildeten Hängedachformen kann anhand der vorgestellten Kriterien zum Lastabtrag bzw. Kräfteverlauf und zur Dachform erfolgen. Weitere Kriterien, die nicht unmittelbar durch die Hängedachform festgelegt sind, sondern von weiteren Randbedingungen abhängen, sind je nach Aufgabenstellung ergänzend zu betrachten.

Bestehende Entwürfe von Hängedachformen können mit den aufgezeigten Modifikationsmöglichkeiten entsprechend den projektspezifischen Zielvorgaben angepasst werden. An verschiedenen Beispielen wird aufgezeigt, wie Dachformen bereits durch geringfügige Änderungen die gewünschten Eigenschaften annehmen können.

Die vorgestellte Entwurfsmethodik sowie die Modifikationsmaßnahmen ermöglichen variantenreiche und gleichzeitig systematische Formfindungen für Hängedachflächen unter Berücksichtigung verschiedener geometrischer Randbedingungen. Aus der Dachform und dem Tragverhalten resultieren die aufgezeigten hängedachspezifischen Aspekte, deren baupraktische Lösungen im Folgenden aufgezeigt werden.

5 Hängedachspezifische Einwirkungen und Tragsysteme

5.1 Grundlagen

Die Einwirkungen und Tragsysteme von Hängedächern müssen entsprechend den besonderen Trag- und Verformungseigenschaften der Dachkonstruktion gewählt werden. Hierdurch ergeben sich Unterschiede zu konventionellen Dachflächen. Diese betreffen insbesondere die Aspekte

- Einwirkungen
- Bemessung
- Lastabtragungssysteme

Im Folgenden werden die charakteristischen Unterschiede bezüglich der Einwirkungen, der Bemessungsgrundsätze und der Lastabtragung aufgezeigt.

5.2 Einwirkungen auf Hängedächer

Im Regelfall sind bei der statischen Berechnung von Hängedächern Einwirkungen aus Eigengewicht, Wind und Schnee sowie gegebenenfalls eine die Dachfläche aussteifende Vorspannung zu berücksichtigen. Darüber hinaus können Temperatureinwirkungen, Schwinden, Kriechen sowie Verschiebungen der Lagerkonstruktionen die Bemessung zusätzlich beeinflussen. Die genannten Einwirkungen sind nach den normativen Vorgaben der DIN 1055 bzw. des EC 1 so zu kombinieren, dass die für die Bemessung maßgebenden Beanspruchungen resultieren.

Die Einwirkungen aus Wind und Schnee sind jedoch für Hängedächer aufgrund der besonderen Dachform nur schwer zu beschreiben. Die Normenwerke geben hierzu nur vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende Ansätze vor. Da Hängedächer typischerweise als leichte Konstruktionen aufgeführt werden, spielt das Eigengewicht des Daches nur eine untergeordnete Rolle. Daher ist die genaue Kenntnis der vergleichsweise hohen veränderlichen Einwirkungen umso bedeutender.

5.2.1 Eigengewicht

Das Eigengewicht eines Hängedaches kann nur in Sonderfällen als gleichmäßig verteilte Flächenlast angenommen werden. Aufgrund der Dachform nimmt das projizierte Eigengewicht zu den Auflagern hin zu, da die Seillinie in diesem Bereich steiler verläuft. Unter der Wirkung des Eigengewichts stellt sich daher keine parabelförmige Verformungsfigur ein (wie bei einer gleichmäßigen Verteilung), sondern eine Kettenlinienform (siehe Kapitel 4.2).

Das Eigengewicht stellt eine ständige Einwirkung dar und sollte beim Hängedach im Verhältnis zu den veränderlichen Einwirkungen gering sein. Ein geringes Eigengewicht ist prinzipiell eine wichtige Voraussetzung, um große Spannweiten erreichen zu können. Hängedächer in leichter Bauweise sind aufgrund fehlender Steifigkeit jedoch sehr verformungsempfindlich. Daher ist ihre Form durch geeignete Maßnahmen zu stabilisieren.

Bei so genannten „Schwergewichts-Hängedächern“ erfolgt die Stabilisierung des Daches gegen abhebende Windlasten durch eine planmäßige Erhöhung des Eigengewichts der Dachfläche. Die konstruktive Durchbildung sieht hierbei meist eine schwere Dachhaut, gegebenenfalls in Kombination mit zusätzlichen Maßnahmen, vor (siehe Kapitel 6.3.2).

Nach [Büttner 1985] sollten Hängedächer aus Schwerbeton eine Flächenwichte von etwa $1,5 \text{ kN/m}^2$ aufweisen. Ein Leichtbetondach, bei dem eine ausreichende Schalentragwirkung vorliegt, kann bereits mit $0,8$ bis $0,9 \text{ kN/m}^2$ hinreichend gegen Schwingungserscheinungen gesichert sein.

Ungedämmte Blechdächer erreichen sehr geringe Eigengewichte mit nur $0,18 \text{ kN/m}^2$ bzw. $0,20 \text{ kN/m}^2$. Wärmedämmte Dächer weisen in der Regel Flächenwichten zwischen $1,00 \text{ kN/m}^2$ und $1,90 \text{ kN/m}^2$ auf. In Tabelle 5-1 sind die Flächenwichten verschiedener ausgeführter Hängedächer (fett gedruckt) und artverwandter Konstruktionen als charakteristische Werte angegeben.

Tabelle 5-1 Eigengewicht der Dachfläche von Hängedächern und artverwandten Konstruktionen

BNr.	Bezeichnung	Standort	Wichte [kN/m^2]
87	Ausstellungshalle Rio Grande do Sul	Sao Paulo	0,06
62	Französischer Pavillon	Zagreb	0,18
45	Pavillon de la France	Brüssel	0,18
93	rechteckige Pavillons	Nischni Nowgorod	0,20
73	Getreidelagerhalle	Albany	0,20 – 0,25
79	Raleigh-Arena	Raleigh	0,30
65	Rundhalle	Gleisdorf	0,40
6	Reparaturhalle für Omnibusse	Berlin-Weißensee	0,45
74	Hockey-Stadion	New Haven	0,50
88	Stadion	Montevideo	0,65
98	1. Sporthalle Yoyogi	Tokio	0,80
60	Werkhof	Hohenems	1,00
10	Messehalle 26	Hannover	1,20
16	Westfalenhalle 4	Dortmund	1,30
20	Schwimmoper	Wuppertal	1,50
57	Sporthalle St. Jakob	Basel	1,50
27	Friedrich-Ebert-Halle	Ludwigshafen	1,75
63	Technische Oberschule für Energetik	Sofia	1,85
22	Sportschwimmhalle	Dresden	1,90
24	Lufthansa-Wartungshalle	Frankfurt	2,45

5.2.2 Schnee

Bei Hängedächern liegt die Höhe der bemessungsrelevanten Schneelasten üblicherweise in der Größenordnung des Dacheigengewichts. Die Schneelasten können halbseitig und je nach Dachform auch als Schneeanhäufung auftreten. Die Form der Seillinie ist daher entscheidend von der Größe und Verteilung der Schneelasten abhängig (Bild 5-1).

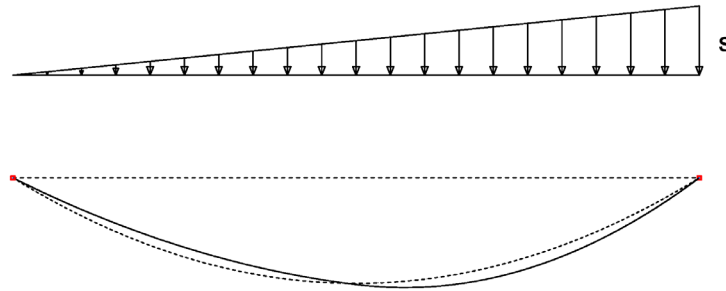


Bild 5-1 Lastbild einer ungleichmäßigen Belastung aus Schnee mit zugehöriger Verformungsfigur in Dachlängsrichtung

Die Größe und Verteilung der in Deutschland rechnerisch anzusetzenden Einwirkungen aus Schnee ergeben sich aus der DIN 1055-5 bzw. dem EC 1. Bei sehr flachen Dächern ist auf der gesamten Dachfläche die volle konstante Schneelast zu berücksichtigen. An sehr steilen Stellen rutscht der Schnee ab, wodurch rechnerisch eine verminderte Last angesetzt werden kann. Die Schneelasten konzentrieren sich im tief liegenden Bereich der Dachfläche, so dass sich bei der Kombination mit dem Eigengewicht eine nahezu konstante Einwirkung auf die Dachfläche ergeben kann (Bild 5-2).

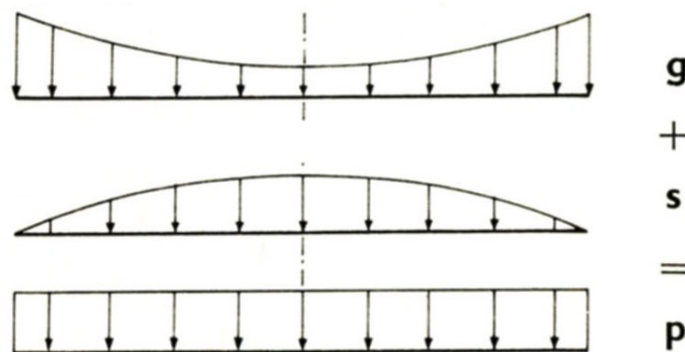


Bild 5-2 Verteilung von Eigengewicht g und Schneelast s mit möglicher resultierender Gesamtlast p in Längsrichtung eines Hängedachs [Büttner 1985]

Die normativen Vorgaben beinhalten jedoch nur theoretische, konservative Ansätze. Genauere Untersuchungen, die auch den Einfluss des Windes auf die Verteilung des Schnees berücksichtigen, können in Windkanalversuchen an Bauwerksmodellen durchgeführt und durch Messungen am fertig gestellten Bauwerk überprüft werden.

5.2.3 Wind

Die Windlasten gehören ebenfalls zu den für Hängedächer maßgebenden veränderlichen Einwirkungen. Im Vergleich zu den Einwirkungen aus Schnee können sie in der Realität in Größe und Verteilung sehr ungleichmäßig auftreten und sich verhältnismäßig schnell verändern. Die normativen Angaben der zu berücksichtigenden Windeinwirkungen (z. B. in der DIN 1055-4 und dem EC 1) basieren auf verallgemeinerten Messwerten. Die auf ein Bauwerk einwirkenden Windlasten sind stark von der Anströmrichtung abhängig. Weiterhin besteht eine Abhängigkeit von der Dachneigung, die bei einem Hängedach an jeder Stelle variiert. Das Dach wird zur Bemessung typischerweise in mehrere Lastbereiche unterteilt, im Wesentlichen werden dabei innen liegende Flächen von Rand- und Eckbereichen unterschieden. Dachränder und -ecken sind besonders hohen Windsogkräften ausgesetzt, die rechnerisch nur schwer erfasst werden können. Daher ist es sinnvoll, gefährdete Bereiche, besonders die freien Ränder, konstruktiv zu verstärken und gegen Abheben zu sichern.

Bild 5-3 zeigt beispielhaft die Verteilung der Windsogbeiwerte auf einer parabolischen Hängedachfläche nach Babajeva.

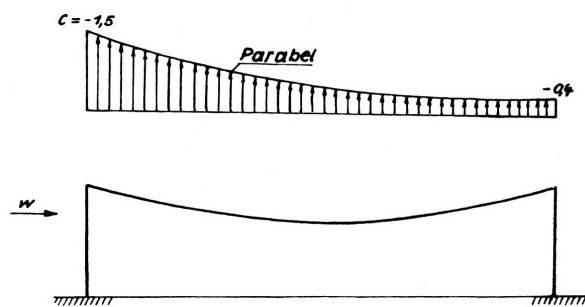


Bild 5-3 Verteilung der Windsogbeiwerte für parabolische Hängedächer nach Babajeva [Quade 1969]

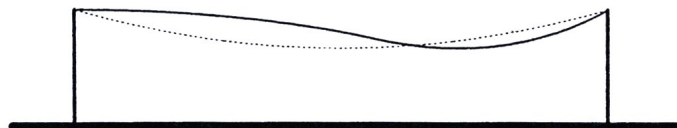
Bei Hängedächern handelt es sich meist um flach geneigte Dächer, so dass auf den Dachflächen allgemein Windsoglasten wirken. Schon kleine Neigungswechsel oder Änderungen in der Anströmrichtung können dazu führen, dass sich nicht nur die Größe, sondern auch die Richtung der Windkräfte ändert. Weiterhin müssen bei seitlich offenen Bauwerken oder bei Gebäuden mit großen Öffnungen ggf. auch Windlasten auf der Dachunterseite berücksichtigt werden.

Die Einwirkungen aus Wind sind zudem abhängig von den Dachverformungen. Eine infolge der Windlasten verformte Dachfläche kann zu erhöhten Soglasten führen und so die Verformungen noch vergrößern. In Extremfall kommt es zum Durchschlagen der gesamten Dachfläche (Bild 5-4) [Saber 1997]. Bei Hängedächern in leichter Bauweise ist der Einfluss der Windlasten auf die Dachverformungen besonders groß, vor allem wenn sich asymmetrische Belastungszustände ergeben.

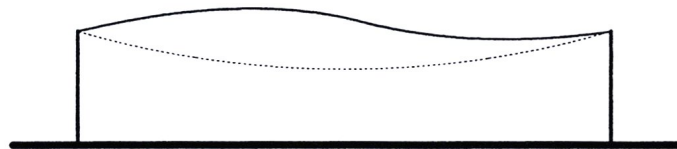
I) Ausgangsgeometrie



II) verformtes Dach



III) große Verformungen



IV) durchgeschlagenes Dach

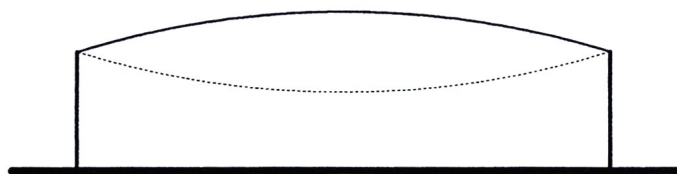


Bild 5-4 Verschiedene Durchschlagphasen eines Hängedachs unter Windlast von links [Saberi 1997]

Der Wind stellt eine dynamische Einwirkung dar. Neben der gleichmäßigen Umströmung des Gebäudes werden ebenso kurzzeitig wirkende Kräfte aus Böen, Turbulenzen oder Verwirbelungen erzeugt. Die daraus resultierenden Schwingungen und Fluttererscheinungen sind insbesondere bei verformungsanfälligen Bauwerken wie Hängedächern nur sehr schwer beschreibbar. Die Wechselwirkung zwischen dem verformbaren Dach, den auftretenden Windlasten und deren Auswirkungen auf das Bauwerk bedürfen daher im Regelfall einer genaueren Untersuchung (siehe Bild 5-5).

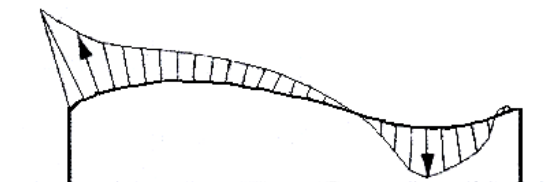


Bild 5-5 Verteilung der Windlasten bei einem nach oben durchgeschlagenen Dach [Rosemeier 1998]

Besonders leichte Hängedächer sind anfällig für dynamische Effekte. Zur Ermittlung genauer Windlasten, gegebenenfalls auch zur Erfassung des Kräfteverlaufs, der Verformungen sowie des dynamischen Verhaltens des Daches können Modellversuche im Windkanal, Computersimulationen oder Messungen am fertigen Bau durchgeführt werden. In Bild 5-6 sind die Messergebnisse für eine Sporthalle in Tokio dargestellt. Bild 5-7 zeigt den Verlauf der Beiwerte der rechtwinklig zum Dach angreifenden Windkräfte für die Schwimmoper in Wuppertal.

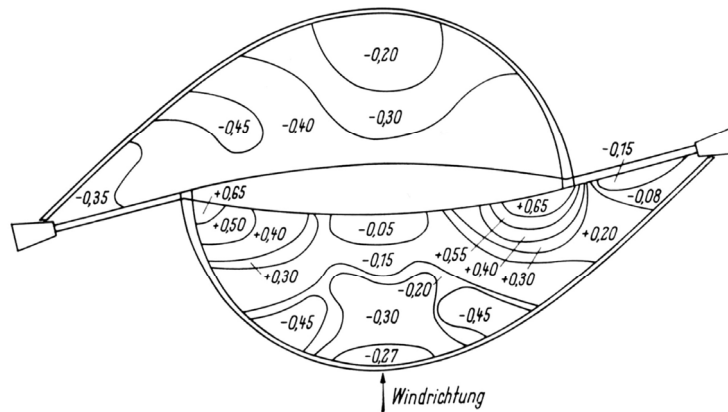


Bild 5-6 Verteilung der Winddruckbeiwerte über die Dachfläche, 1. Sporthalle Yoyogi (BNr. 98) [Tsuboi 1966]

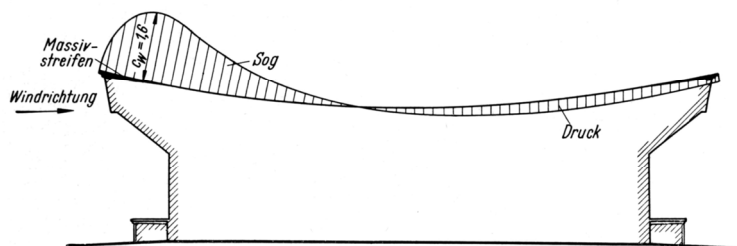


Bild 5-7 Verlauf der rechtwinklig zum Dach angreifenden Windkräfte, ausgedrückt im Beiwert c_w , Schwimmoper Wuppertal (BNr. 20) [Hetzelt 1957]

Hängedächer, bei denen die zu erwartenden Windlasten besonders hoch sind, erfordern sehr aufwendige Maßnahmen zur Stabilisierung ihrer Dachfläche. Die hierdurch entstehenden zusätzlichen baulichen Anpassungen und Kosten können dazu führen, dass die Entscheidung für eine Ausführung als Hängedach hinterfragt werden muss.

Beispielhaft steht hierfür die konkav geschwungene Dachfläche der Elbphilharmonie, die ursprünglich als ein Hängedach ausgeführt werden sollte. Windkanalversuche ergaben für das in etwa 100 m Höhe in exponierter Lage frei im Hafengebiet stehende Dach sehr große zu erwartende Windlasten. Die hieraus erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen der Dachfläche wären nach Aussage des beteiligten Tragwerksplaners Herrn Dr.-Ing. Andresen konstruktiv jedoch nicht vertretbar gewesen [Andresen 2011]. Daher kommt in der Ausführung nun ein Dach mit gebogenen Doppel-T-Trägern aus Stahl zum Einsatz.



Bild 5-8 Elbphilharmonie Hamburg (Fotomontage), Architekten: Herzog & de Meuron [Schnetzler 2006]

5.2.4 Vorspannung

Bei der Vorspannung einer Dachfläche wird die druckfeste Dacheindeckung durch eine von außen in die Zügelemente eingeleitete Längskraft (Vorspannkraft) überdrückt. Die Zügelemente werden dabei gleichzeitig gedehnt. Eine Vorspannung erfolgt in der Regel bei Querschnitten aus Stahlbeton, es ist aber auch möglich, die Vorteile des Vorspannens auf Elemente aus anderen Materialien zu übertragen.

Durch das Aufbringen einer Vorspannung kann das Tragverhalten der Stahlbetonbauteile verbessert werden. Der Betonquerschnitt wird an den Stellen, an denen Zugbeanspruchungen auftreten, künstlich überdrückt, so dass im Querschnitt lediglich Druckspannungen bzw. nur geringe Zugspannungen resultieren. Der Beton bleibt daher rissefrei. Zudem verformen sich vorgespannte Konstruktionen infolge der höheren Steifigkeit unter äußeren Lasten weniger stark als solche mit schlaffer Bewehrung. Sie sind somit bei gleichem oder sogar vermindertem Querschnitt steifer und zudem weniger schwingungsanfällig. Es lassen sich größere Spannweiten und damit schlankere Tragwerke bei geringerem Eigengewicht realisieren. Allerdings sind Spannbetonbauwerke gegenüber Stahlbetonbauwerken aufwendiger herzustellen.

Die Vorspannung der Dachfläche eines Hängedachs erzeugt einen so genannten „Eigenspannungszustand“, bei dem die Größe der Zugkräfte in den Spannstählen der Größe der Druckkräfte im Beton entspricht. Daher resultieren aus der Vorspannung keine Auflagerkräfte.

Bei Hängedächern ist es sinnvoll, die Vorspannung so einzustellen, dass auch unter Einwirkungen aus Schnee eine Druckvorspannung im Querschnitt verbleibt. Infolge der rechnerischen Schneelast werden somit Zugrisse vermieden.

5.2.5 Modellversuche und Probelastungen

Die Bestimmung der Größe und Verteilung von Wind- und Schneeeinwirkungen auf Hängedächer kann mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen erfolgen. Hierzu werden Bauwerksmodelle genutzt, die die dreidimensionale Abbildung des gesamten Gebäudes oder auch nur eines Gebäude-

teils im meist verkleinerten Maßstab darstellen. Dabei können unterschiedliche Modellbautechniken zur Anwendung kommen.

Im Leichtbau fällt den Modellversuchen eine besondere Bedeutung zu. Da viele leichte Flächen-tragwerke sowohl in ihrer Gebäudeform als auch in ihrem Tragverhalten von üblichen Hochbauten abweichen, sind normierte Lastansätze und Berechnungsverfahren nur eingeschränkt anwendbar. Die auf Bauwerke rechnerisch anzusetzenden Windlasten bleiben auf Standardfälle beschränkt, für die ausreichende, aus Windkanaluntersuchungen gewonnene Erkenntnisse vorliegen. In allen anderen Fällen, d. h. bei erheblich abweichenden Bauformen, sind gesonderte Betrachtungen erforderlich.

Sinnvoll sind genauere Untersuchungen insbesondere dann, wenn die normativ zu berücksichtigenden Windeinwirkungen aufgrund einer ungenügenden Übertragbarkeit zu unwirtschaftlichen Ausbildungen führen bzw. eine Nachweisführung mit konservativen Annahmen nicht möglich ist. Objektspezifische Betrachtungen führen in der Regel zu geringeren Einwirkungen. Darüber hinaus können die durch Wind ausgelösten Erscheinungen wie Schwingungen und Flattern erfasst werden.

Mögliche Methoden zur Bestimmung der Windlasten sind Modellversuche im Windkanal oder numerische Berechnungsmodelle. Die Modelle können je nach Anforderung starr oder elastisch ausgebildet sein. Zur Bestimmung der Windlasten als Grundlage für die statische Berechnung können vereinfacht starre Modelle verwendet werden (Bild 5-9 und Bild 5-10).

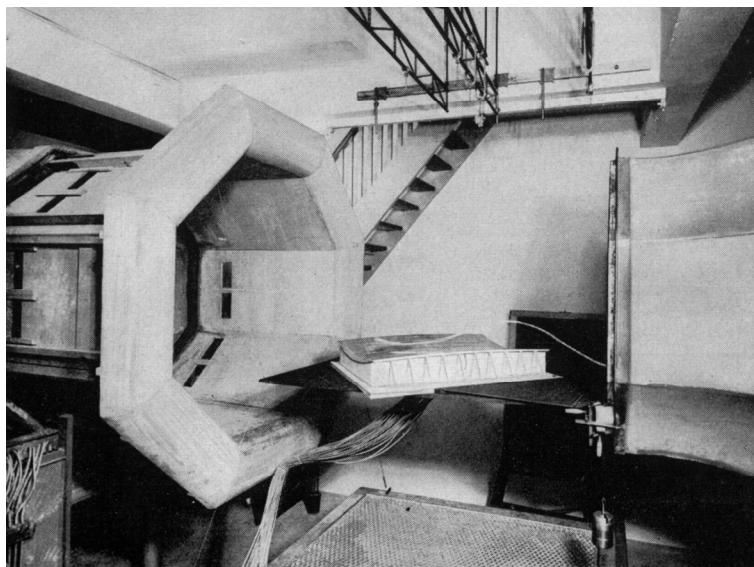


Bild 5-9 Windkanalversuche am Modell der Westfalenhalle 4 in Dortmund (BNr. 16) [Vaessen 1959]

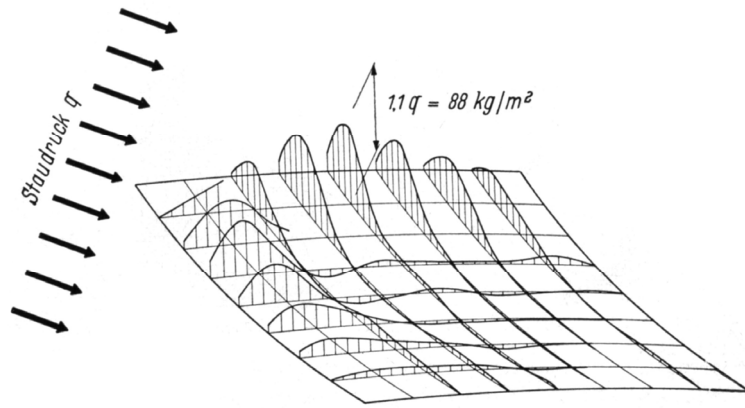


Bild 5-10 Darstellung der Versuchsergebnisse [Vaessen 1959]

Sollen zusätzlich auch Strukturantworten des Bauwerks wie beispielsweise Verformungen ermittelt werden, sind elastische Modelle zu nutzen. Hierbei ist es wichtig, dass die Steifigkeiten im Modell und im Original nach Maßstabgesetzen aufeinander abgestimmt werden. In diesem Fall können die im Versuch gewonnenen Ergebnisse auf das reale Bauwerk übertragen werden. Es ist jedoch schwierig, alle Ähnlichkeitsforderungen an das Modell zu erfüllen. Eine lineare Verkleinerung der Bauwerksabmessung führt zu Fehlern, da sich die physikalisch relevanten Größen wie Massen, Trägheitsmomente, Luft- und Massenkraft mit unterschiedlicher Potenz ändern. Um dynamische Effekte im Modell richtig zu erfassen, ist insbesondere eine Abstimmung von Massen und Dämpfung erforderlich. Da selbst kleine Messeinrichtungen die Ergebnisse von Windkanalversuchen beeinflussen können, ist die Erfassung mit optischen Instrumenten anzustreben. Modellversuche an Dächern mit komplexer Geometrie wurden beispielsweise für die 1. Sporthalle Yoyogi in Tokio durchgeführt, bei der die doppelt gekrümmte Dachfläche mit seilverspannten, gebogenen Hauptträgern gebildet wird (Bild 5-11 und Bild 5-12).

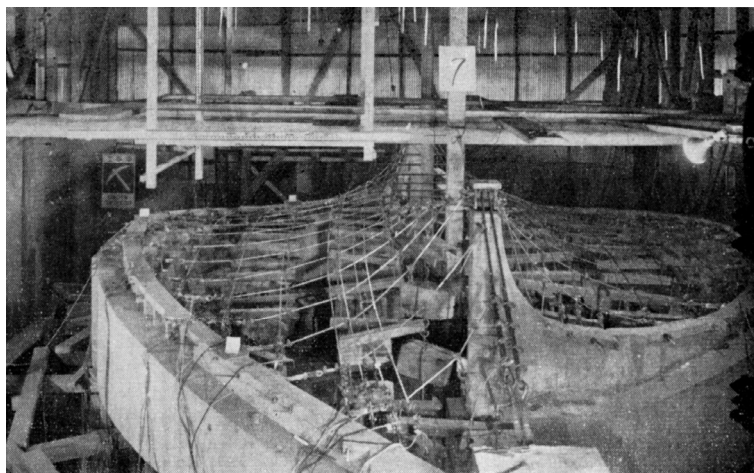


Bild 5-11 Modell 1:30 aus Beton und Drahtseilen zur Untersuchung der Verteilung der Zugkräfte verschiedener Vorspannungszustände und Temperaturänderungen, 1. Sporthalle Yoyogi (BNr. 98) [Tsuboi 1966]

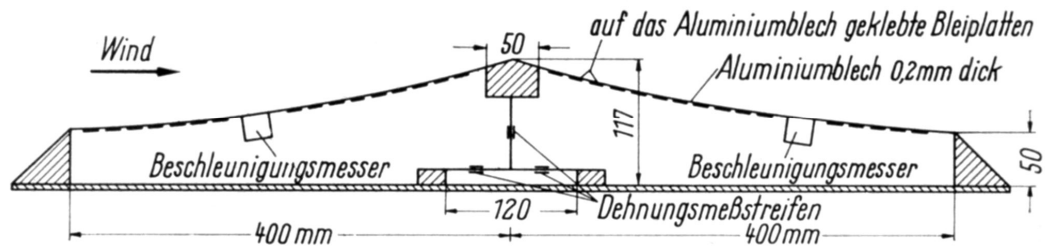


Bild 5-12 Skizze eines Teilmodells aus 0,2 mm dicken Aluminium-Blechen für Anströmversuche zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens und zur Abschätzung der Flattergefahr [Tsuboi 1966]

Anhand der Ergebnisse aus Modellversuchen können gegebenenfalls erforderliche Stabilisierungsmaßnahmen geplant werden (siehe Kapitel 6.3). Bild 5-13 zeigt Modellversuche zur Entwicklung des Hängedachs des c-Office in Nagoya (Japan).

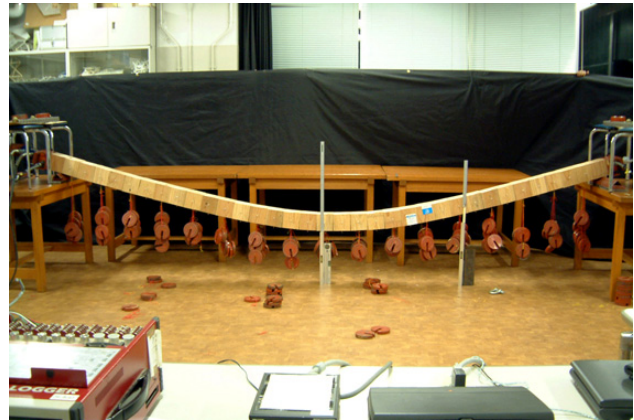
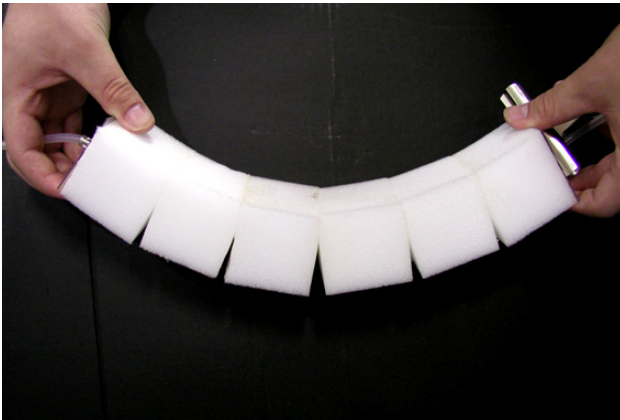


Bild 5-13 Modell der aufgefädelten Holzelemente (links), Arbeitsmodell zur Ermittlung der optimalen Biegelinie bei Variation der Steifigkeit über die Vorspannung (rechts), c-Office Nagoya (BNr. 97) [FT Architects]

Da sich Schneeanhäufungen auf Dächern in Abhängigkeit von den Windverhältnissen einstellen, können Windkanalversuche auch zur Ermittlung der Schneelastverteilung in Abhängigkeit von verschiedenen Anströmbedingungen verwendet werden.

Aktuelle Bestrebungen haben zum Ziel, Wechselwirkungen zwischen Wind und dem (verformten) Strukturmodell mittels Computersimulationen zu erfassen (siehe Bild 5-14) [Saber 1997].

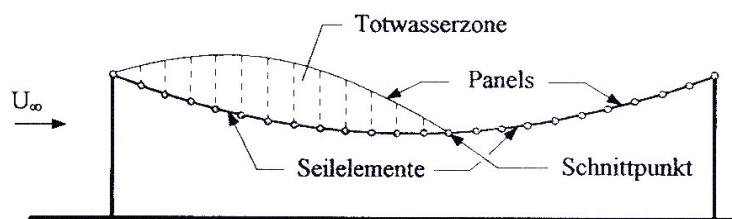


Bild 5-14 Diskretisierung eines Hängedachs durch Seilelemente zur rechnerischen Ermittlung der Windlasten nach [Saber 1997] [Rosemeier 1998]

Aufgrund der hierbei genutzten Vereinfachungen ergeben sich Abweichungen zwischen den am fertigen Bau gemessenen und den am Modell ermittelten Werten. Schon bei der Versuchsdurchführung können Messungenauigkeiten auftreten. Weiterhin können am fertigen Bau in den Voruntersuchungen nicht erfasste Ausbauten die Steifigkeit des Daches unerwartet erhöhen und somit den Kraftverlauf beeinflussen. Entscheidend ist aber, dass die wirkliche auf das Gebäude einwirkende Windstömung im Modell nicht abgebildet werden kann, da der Modellwind in der Regel sehr stetig in Richtung und Größe erzeugt wird und sich sowohl die Windströmung als auch Verwirbelungen und Turbulenzen im Windkanal nicht beliebig erzeugen lassen.

Daher sollten die am Modell gewonnenen Ergebnisse durch Messungen am fertigen Bau überprüft werden. Mittels Probelastungen (durch aufgelegte oder angehängte Lasten) können Verformungen und Kräfte überprüft werden. Zur langfristigen Beobachtung der Gebäudeverformungen eignen sich Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen.

5.3 Grundsätze zur Bemessung

Für die Bemessung sind aus den genannten Einwirkungen die jeweils ungünstigsten Einwirkungskombinationen für den Endzustand und die verschiedenen Bau- bzw. Vorspannzustände zu bilden.

Die Haupttragelemente von Hängedächern gehen in statischer Sicht auf das beidseitig gehaltene, durchhängende Seil zurück. Da in Seilen nur Zugkräfte auftreten, kann auf Biege- und Knickuntersuchungen verzichtet werden. Weil leichte Hängedächer sich infolge angreifender Lasten jedoch stark verformen, müssen die Schnittgrößen geometrisch nichtlinear am verformten System ermittelt werden. Die Wechselwirkungen zwischen den angreifenden Windlasten und den Strukturverformungen der Dachfläche sind wie beschrieben in der Regel schwer zu erfassen und müssen daher gegebenenfalls auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden. Bei der Bemessung leichter Dächer ist im Rahmen der Nachweisführung insbesondere das dynamische Verhalten bei wind-erregten Schwingungen zu untersuchen.

Prof. R. Sarger führte Untersuchungen mit dem Ziel durch, für alle Typen von Hängedächern einheitliche Berechnungsverfahren zu entwickeln [Bräuer 1971]. Schon die Erfassung der Größe und Verteilung der Windlasten stellte dabei jedoch eine große Schwierigkeit dar. In der Vergangenheit wurde daher häufig auf Windkanaltests zurückgegriffen, um die angreifenden Windkräfte für eine rechnerische Bemessung zu ermitteln sowie Verformungs- und Schwingungsuntersuchungen am Modell durchzuführen.

Aufgrund großer Unsicherheiten bei der Auslegung und Bemessung von Hängedächern wurde bei der Realisierung verschiedener Bauvorhaben eine planmäßige Überdimensionierung vorgenommen. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise stellt die Rundhalle in Gleisdorf (1962) dar, bei der das durch Berechnungen ermittelte Ballastgewicht in der Ausführung verdoppelt wurde [Beer 1963].

Messungen an verschiedenen bestehenden Bauwerken bestätigen, dass die tatsächlich auftretenden Verformungen deutlich unter den theoretisch ermittelten liegen. Als maßgebende Ursache hierfür liegt nahe, dass reale Hängedächer sich häufig aufgrund der Steifigkeit der Dachhaut entsprechend

einer Schale verhalten. Die hierbei auftretende Querverteilung führt dazu, dass Lasten nicht nur in Längs- sondern auch in Querrichtung der Zugelemente abgetragen werden. Diese Einflüsse konnten mit früheren, oft vereinfachten Berechnungsansätzen nicht erfasst werden.

Heutzutage können Berechnungen nach Theorie II. Ordnung bei verhältnismäßig geringem Aufwand mit mehrdimensionalen FE-Modellen numerisch durchgeführt werden. Auch dynamische Vorgänge und Wechselwirkungen zwischen Windlasten und Dachgeometrien lassen sich mit Computermodellen simulieren. Auf diese Weise sind genauere Ergebnisse über die Kräfte- und Spannungsverteilungen sowie die Verformungen des Hängedachs berechenbar.

Neben der Bemessung der Hängedachfläche umfasst die statische Berechnung auch die Nachweiseführungen aller weiteren lastabtragenden Bauteile, wie Randträger, Abspannungen, Maste oder andere Unterstützungen bis hin zu den Fundamenten oder Verankerungen im Baugrund.

5.4 Analyse der Lastabtragung am Gesamtsystem

5.4.1 Ansatzpunkt

Hängedächer zeichnen sich dadurch aus, dass die einwirkenden Lasten durch die Haupttragelemente über große Spannweiten ausschließlich über Zugbeanspruchungen abgetragen werden. Zur Weiterleitung der Zugkräfte aus den Haupttragelementen stehen unterschiedliche Tragstrukturen zur Verfügung. Die Größe der weiter zu leitenden Zugkräfte wird maßgeblich durch die Ausbildung des Hängedachs beeinflusst. Im Folgenden werden daher unterschiedliche Einflussparameter auf die Lastabtragung am Gesamtsystem untersucht und konstruktive Ausbildungsmöglichkeiten aufgezeigt.

5.4.2 Grundlagen zur Ausbildung und zum Lastabtrag am Gesamtsystem

Hängedächer weisen im Vergleich zu anderen für weit gespannte Dachkonstruktionen geeignete Bauarten eine geringe Konstruktionshöhe (entspricht dem Durchhang f) auf. Die Bauhöhe des Zugtragelements kann noch deutlich geringer ausgeführt werden. Bei den untersuchten Hängedächern (siehe Anhang) liegt das Verhältnis von Durchhang zu Spannweite mehrheitlich im Bereich zwischen $L/11$ bis $L/16$. Den kleinsten relativen Durchhang besitzt das Hängedach der Römertherme (Baden bei Wien, 1999, BNr. 66) mit weniger als $L/35$, das im Vergleich größte Verhältnis liegt beim Dach der Lowara Company Offices (Montecchio Maggiore, 1985, BNr. 61) mit annähernd $L/6$ vor. Tabelle 5-2 zeigt gegenüberstellend eine Zusammenstellung der Konstruktionshöhen verschiedener Tragsysteme.

Tabelle 5-2 Konstruktionshöhen verschiedener Tragsysteme

Name	Konstruktionshöhe	empfohlene Spannweite
Walzträger	$L/30$ bis $L/20$	bis 5 m
Stahlbetonträger	$\sim L/12$	---
Spannbetonträger	$\sim L/18$	---
BSH-Träger	$\sim L/17$	10 m bis 35 m
unterspannter Träger	$L/12$ bis $L/6$	10 m bis 30 m
Stahlfachwerk	$L/14$ bis $L/6$	20 m bis 40 m
Holzfachwerk	$L/15$ bis $L/10$	7,5 m bis 60 m
Dreigelenkrahmen (Stahl)	$\sim L/12$ (Riegel)	---
Dreigelenkrahmen (Holz)	$\sim L/10$ (Riegel)	---
Zweigelenkrahmen (Stahl)	$\sim L/30$ (Riegel)	---
Zweigelenkrahmen (Holz)	$\sim L/25$ (Riegel)	---
Eingespannter Rahmen (Stahl)	$\sim L/33$ (Riegel)	---
Eingespannter Rahmen (Holz)	$\sim L/27$ (Riegel)	---
Dreigelenkbogen (Stahl)	$\sim L/40$	bis 100 m
Dreigelenkbogen (Holz)	$\sim L/30$	bis 100 m
Zweigelenkbogen (Stahl)	Stich $\sim L/8$	bis 100 m
Zweigelenkbogen (Holz)	Stich $\sim L/8$	bis 100 m
Eingespannter Bogen (Stahl)	Stich $\sim L/9$	bis 100 m
Hängetragwerk (verschiedene Materialien)	Durchhang $L/16$ bis $L/11$	bis 200 m

Infolge des Tragmechanismus von Hängedächern stellen sich an den Auflagerpunkten selbst bei kleiner vertikaler Dachlast vergleichsweise hohe Horizontalkräfte ein. Die Größe der Horizontalkräfte ist dabei abhängig vom Durchhang: je geringer der Durchhang, desto straffer muss das Seil gespannt werden und desto größere horizontale Kräfte sind an den Auflagerpunkten aufzunehmen (siehe Kapitel 4.6.3).

Aus der Geometrie der Zügelemente ergibt sich, dass bei Einhaltung einer bestimmten lichten Raumhöhe entweder kleine Auflagerkräfte bei hohen Dachauflagerpunkten (Bild 5-15, links) oder größere Auflagerkräfte in niedrigerer Auflagerhöhe (Bild 5-15, rechts) in Kauf genommen werden müssen. Im Regelfall ist die Ausführung mit geringeren horizontalen Lagerkräften statisch günstiger, weist jedoch aufgrund der größeren Gesamtbauhöhe ästhetische Nachteile auf. Im Entwurfsprozess ist daher eine Abwägung zwischen der Reduzierung der Horizontalkräfte und der Optimierung der Gesamtbauhöhe vorzunehmen.

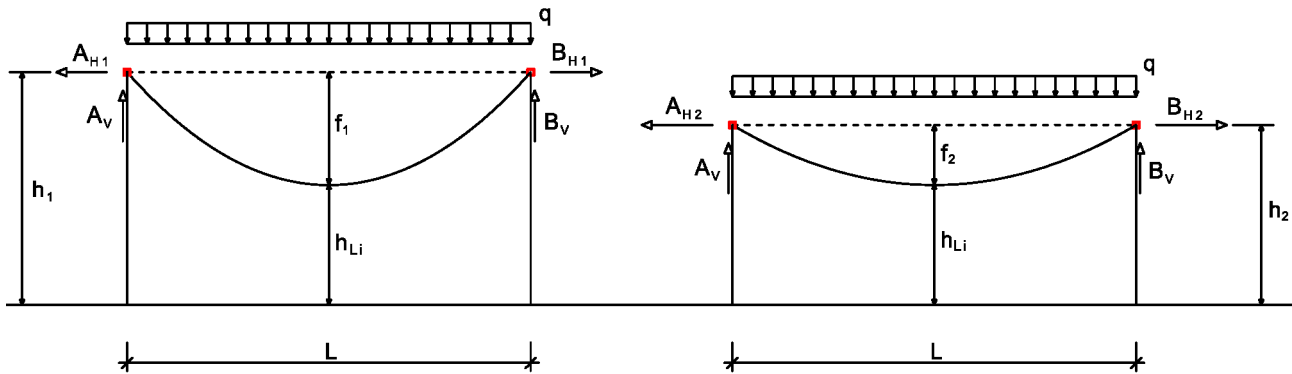


Bild 5-15 Zusammenhang zwischen Durchhang, horizontalen Auflagerkräften und Höhe der Auflager

links: großer Durchhang, kleine horizontale Auflagerkräfte, große Auflagerhöhe

rechts: kleiner Durchhang, große horizontale Auflagerkräfte, kleine Auflagerhöhe

Aufgrund der hohen Horizontalkräfte ist beim Entwurf des Tragwerks in jedem Fall eine Lastverfolgung bis zu den Gründungen erforderlich. Die Ausbildung der Dachfläche ist wie beschrieben ein entscheidender Faktor für die Ästhetik und Wirtschaftlichkeit des gesamten Bauwerks. Die mit der Wahl eines flach ausgebildeten Hängedachs zu erzielenden Vorteile können durch das Erfordernis einer massigen, unrationalen Stützkonstruktion wieder aufgehoben werden. Die Wirtschaftlichkeit und Ästhetik des Gesamtbauwerks hängt also ganz entscheidend von einer sinnvollen Planung des Zusammenwirkens von Dachfläche und Lagerkonstruktion ab.

Da Hängedächer in der Regel Lasten nur in Richtung der Tragseile zu den durch die Auflagerpunkte gebildeten Rändern ableiten, sind quer dazu, d. h. an den freien Längsrändern planmäßig keine Kräfte zu übertragen. Um am Übergang vom Dach zur Längswand ungewollte Zwängungen zu vermeiden, werden Dach und Wand oft konstruktiv getrennt, so dass das Dach frei zwischen den Auflagerändern spannen kann und der Kraftfluss kontrolliert entlang der Spannrichtung erfolgt (siehe Bild 5-16).

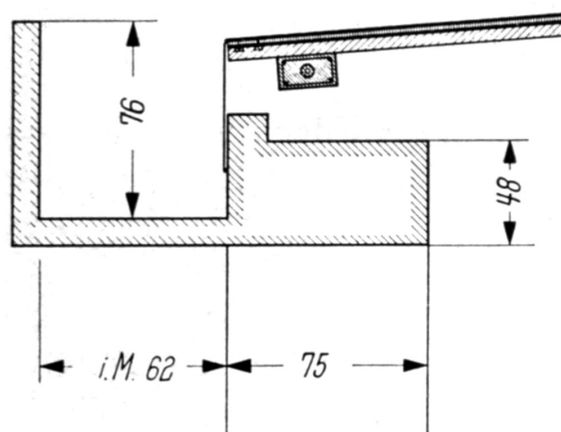


Bild 5-16 Schnitt durch den Längsrand des Hängedachs, Dach und Rinnenträger sind baulich getrennt, Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16) [Vaessen 1959]

Die Systeme der Auflagerkraftabtragung in Hängedächern können in offene oder geschlossene unterteilt werden. Bild 5-17 zeigt die Kraftverläufe beider Systeme im Vergleich.

Bei dem offenen System werden die Lagerkräfte aus der Dachebene herausgeleitet (siehe Bild 5-17 oben). Beim geschlossenen System erfolgt ein Ausgleich der horizontalen Lagerkräfte im Bereich der Dachfläche (Bild 5-17 unten). Im Folgenden werden die zwei unterschiedlichen Randverankerungssysteme näher betrachtet.

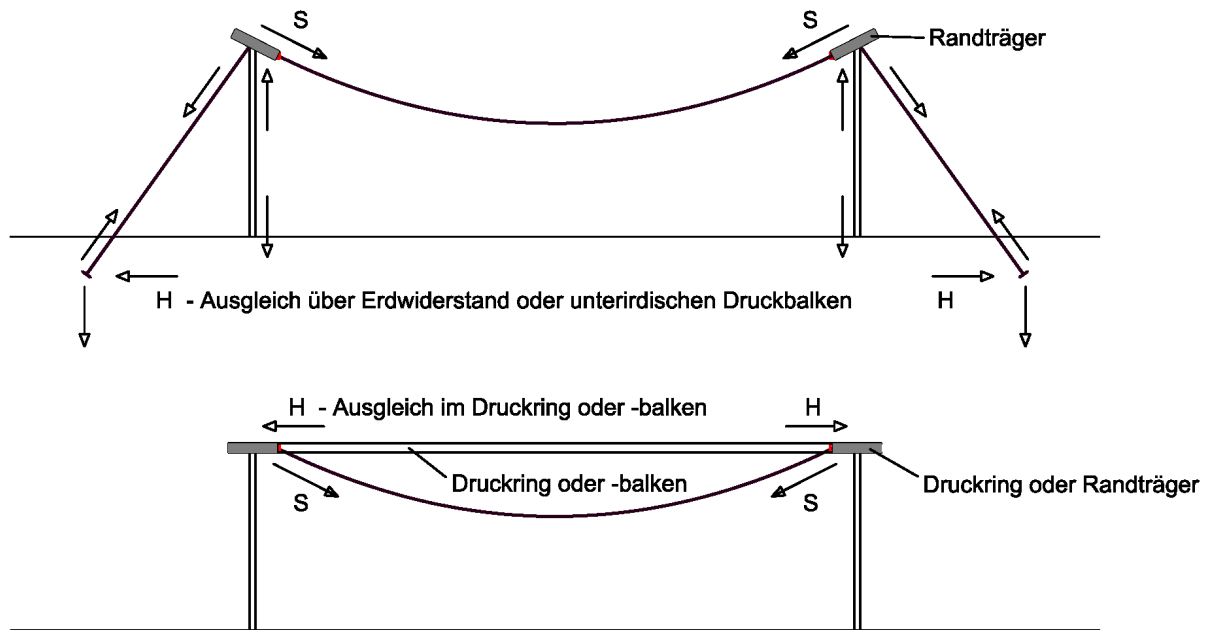


Bild 5-17 Randverankerungssysteme
 oben: offenes System
 unten: geschlossenes System

5.4.3 Offene Randverankerungssysteme

Bei offenen Systemen wird die in der Seilachse wirkende Zugkraft über Stützkonstruktionen in den Baugrund abgeleitet, die unterschiedlich ausgebildet werden können. In der Regel kommen hierbei Bockkonstruktionen mit Druckpfosten und Zugabspannung zum Einsatz. Die Kräfte aus Tragseil, Pfosten und Abspannseil bilden ein geschlossenes Krafteck. Steht der Druckpfosten in der Winkelhalbierenden aus Trag- und Abspannseil, so entspricht die Zugkraft in der Abspannung der angreifenden Seilkraft aus dem Dach. Die Größe der Druckkraft im Pfosten ergibt sich in Abhängigkeit von dem Umlenkwinkel 2α (siehe Bild 5-18).

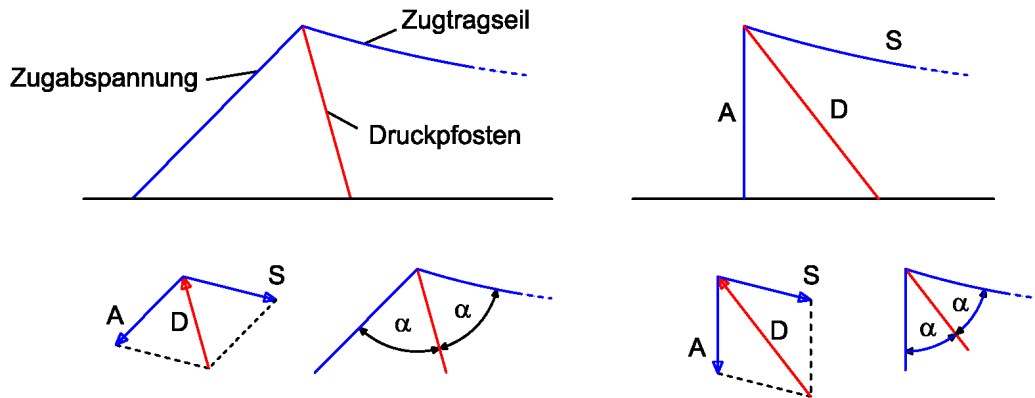


Bild 5-18 Verankerung eines Tragseils mit Abspannseil und Anordnung des Druckpfostens in der Winkelhalbierenden

Für eine optimale Nutzung des Innenraums ist häufig die vertikale Anordnung der Druckpfosten zweckmäßig. Damit einher geht jedoch eine erhöhte Abspannkraft (Bild 5-19, links). Bei steilerer Anordnung des Abspannseils, z. B. mangels Platzbedarf im Außenraum, erhöht sich sowohl die Abspannkraft als auch die Belastung des Druckpfostens deutlich (Bild 5-19, rechts).

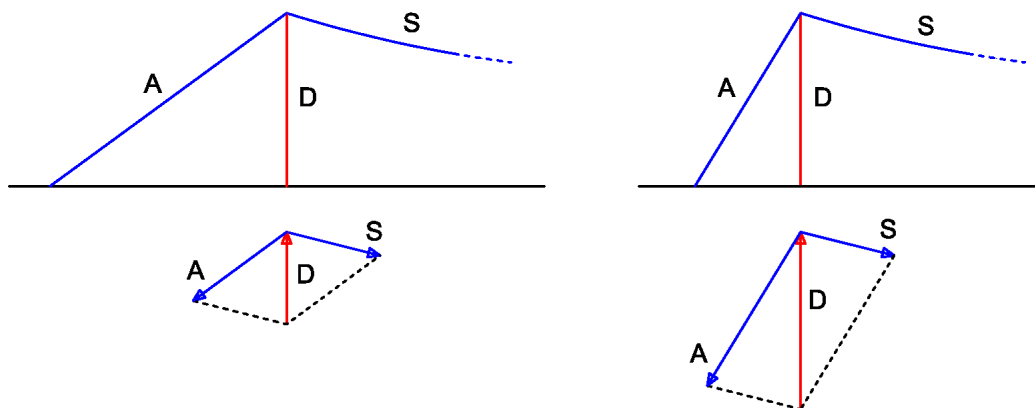


Bild 5-19 Kräfteverlauf bei vertikalem Druckpfosten mit flacher (links) und steiler Ausbildung der Abspannung (rechts)

Die durch das Abspannseil abzutragende Zugkraft kann bei Nutzung eines Gegengewichts reduziert bzw. vollständig aufgehoben werden (siehe Beispiel in Bild 5-20). Reine Gegengewichte wurden bisher nur selten genutzt, da sie die Ästhetik des Gebäudes stark beeinflussen. Lasten aus veränderlichen Einwirkungen müssen zudem durch zusätzliche Maßnahmen abgetragen werden. Bei geschicktem Entwurf können jedoch bestimmte Bauwerksabschnitte die aus dem Hängedach abzutragenden Kräfte vermindern, wie beispielsweise beim Hängedach des Saalbau-Hallenbads in Biel (siehe Bild 5-31, S. 119).



Bild 5-20 Fachwerkbock mit dreieckförmigem Gegengewicht, Lufthansa-Wartungshalle (BNr. 24)
[Büttner 1985]

Als Alternativen zur Abspannung können Bockkonstruktionen (Bild 5-21), massive Widerlager, Wandscheiben (Bild 5-22), Strebepfeiler, vertikale Fachwerke, Rahmen oder wenn möglich auch Verankerungen an benachbarte massive Gebäude ausgeführt werden. Maßnahmen zur Aussteifung des Gebäudes in Querrichtung müssen gegebenenfalls zusätzlich berücksichtigt werden.

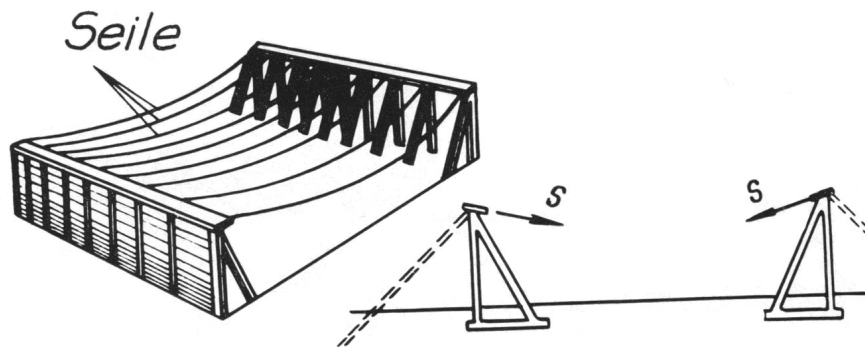


Bild 5-21 Lastableitung über Bockkonstruktionen [Rabinovič 1966]

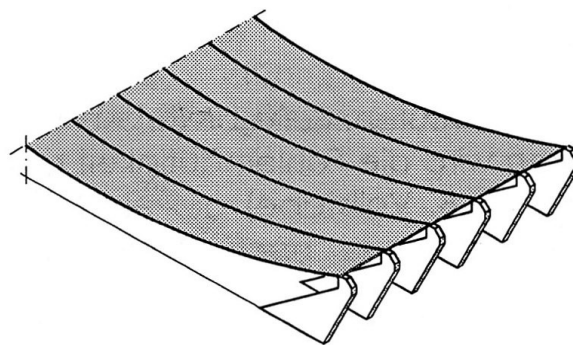


Bild 5-22 Lastableitung über Wandscheiben [Leicher 2002]

In vielen Fällen lassen sich Abspannkonstruktionen in die Bausubstanz integrieren, beispielsweise als Wände von Nebenräumen oder als Unterkonstruktionen für Tribünen. Dennoch benötigen sie Raum, der bei der Planung berücksichtigt werden muss. Bild 5-23 zeigt eine Reparaturhalle für Omnibusse in Berlin-Weißensee von 1963 mit einer Dachkonstruktion aus Seilbindern. Die Lasten aus den Trag- und Spannseilen werden über große Wandscheiben abgeleitet. In den Bereichen

zwischen den Wänden sind Nebenräume angeordnet. In Bild 5-24 ist eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Abspannkonstruktionen als zusätzliche Tragkonstruktion von Tribünen dargestellt.

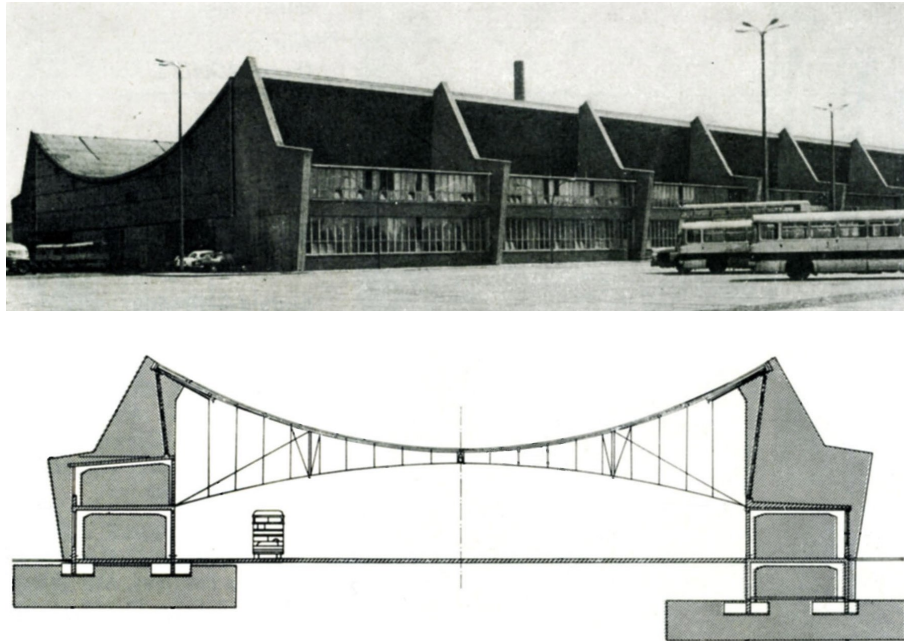


Bild 5-23 Konstruktion mit Seilbindern, in der Dachfläche liegenden Randfachwerkträgern und Wandscheiben, Nutzung des Platzes zwischen den Wandscheiben für Nebenräume, Reparaturhalle für Omnibusse Berlin-Weißensee (BNr. 6) [Büttner 1985]

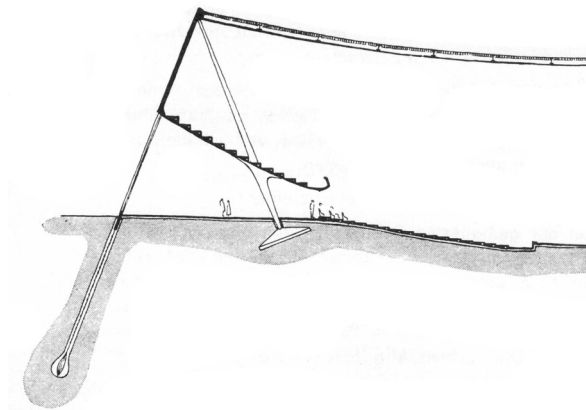


Bild 5-24 Zusätzliche Nutzung der Abspannkonstruktion als Unterkonstruktion für Tribünen einer Sport- und Festhalle, Entwurf: Frei Otto [Otto 1954]

Die direkte Ableitung der Kräfte an jedem einzelnen Auflagerpunkt eines Hängedach-Zugelements ist möglich, aber besonders bei kleinen Seilabständen mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Es bietet sich daher an, die Seillasten über in der Dachebene liegende Randträger – so genannte „Fangeträger“ – aufzunehmen und über diese zu Sammelabspannpunkten entlang der Stirnseite bzw. zu den Bauwerksecken zu leiten, von wo sie konzentriert abgeleitet werden. Die Randträger werden dabei entsprechend einteilig, über die gesamte Stirnseite als Durchlaufträger oder in Form einer Einfeldträgerkette ausgeführt (Bild 5-25).

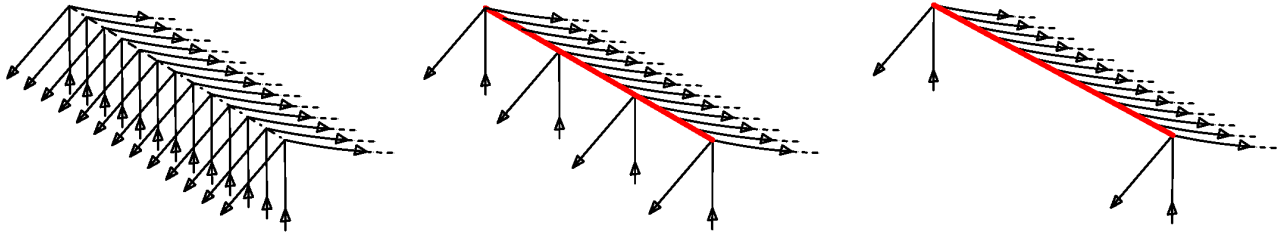


Bild 5-25 Ableitung der Seilkräfte

links: Einzelabspannung ohne Randträger

mittig: Mehrfachabspannung mit einem durchlaufenden oder drei Einfeldträgern

rechts: Eckabspannung mit einem Randträger über die gesamte Stirnseitenbreite

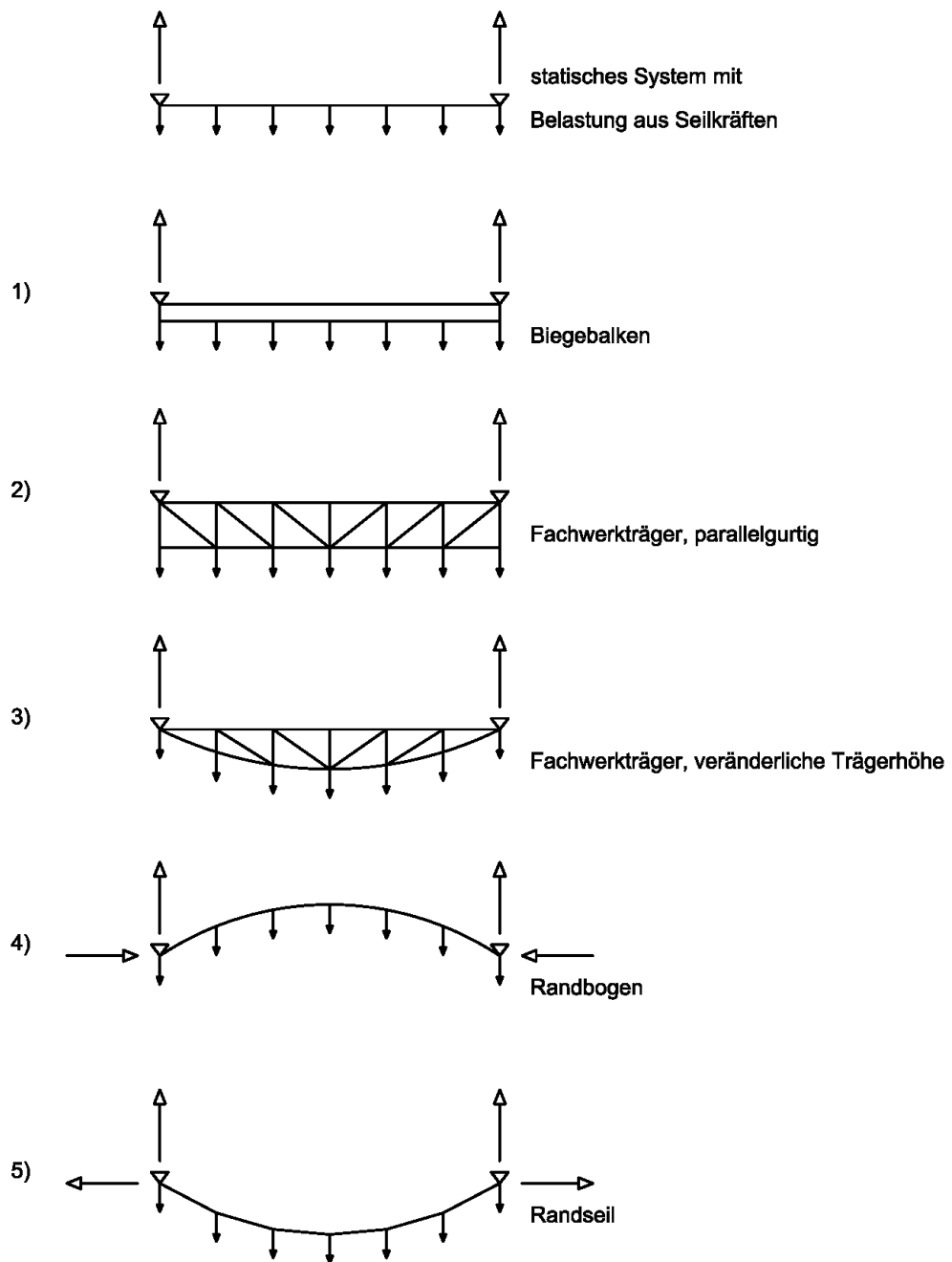


Bild 5-26 Möglichkeiten der Ausbildung von Randträgern (Draufsicht)

In Abhängigkeit von den Spannweiten und den verwendeten Materialien sind hierbei Ausführungen als massiver Biegebalken (Bild 5-26 1), aufgelöst als Fachwerk mit parallelem (Bild 5-26 2), gebogenem Gurt (Bild 5-26 3) oder als Bogen mit Zugband möglich (Bild 5-26 4).

Die Seilkräfte werden beim Randbalken über Biegung, bei Fachwerkträgern über Druck- und Zugkräfte in den Stäben zu den Auflagern geleitet. Druckbogen erzeugen an den Auflagern zusätzliche Horizontalkräfte aus Bogenschub, die beispielsweise durch ein Zugband zwischen den Auflagerpunkten kurzgeschlossen werden können. Der Randträger kann auch durch ein Randseil gebildet werden (Bild 5-26 5). Diese Bauweise stellt die leichteste aber auch verformungsweichste dar, so dass ihre Anwendung auf Bauwerke beschränkt bleibt, bei denen große Verformungen in Kauf genommen werden können. Bei Randseilen können die quer zur Spannrichtung entstehenden Auflagerkräfte durch einen die Auflager verbindenden Druckbalken oder Zugabspannungen quer zur Haupttragrichtung des Daches aufgenommen werden (siehe Bild 5-27).

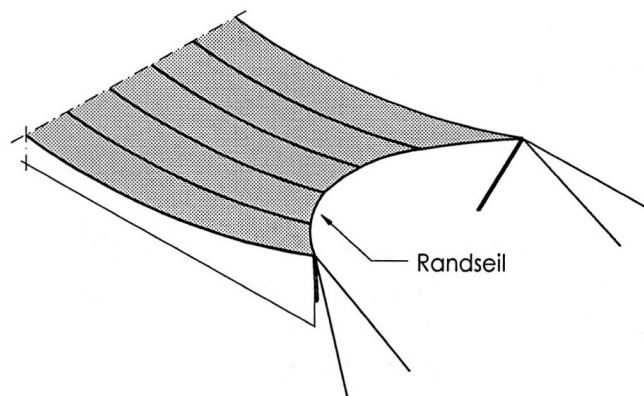


Bild 5-27 Hängedach mit Randseil und Eckabspannungen [Leicher 2002]

Durch die Anbindung der Zugtragelemente an den Randträger sind die Verformungen ihrer Verankerungspunkte miteinander gekoppelt. Bei Ausführung von Mehrfachabspannungen kommt es daher auch bei lokaler Beanspruchung eines Zugtragelements zu Verformungen der benachbarten Bauteile.

Beim Fußballstadion von Braga werden die Tragseile des Dachs in massiven, durchlaufenden Randbalken verankert, die entlang der Köpfe der Tribünen verlaufen (siehe Bild 5-28). Die schräg aufsteigenden Wandscheiben dienen als Widerlager zur Ableitung der Dachlasten und tragen dabei zugleich die Zuschauerränge.



Bild 5-28 Wandscheiben als kombinierte Widerlager- und Tribünenauflegerkonstruktionen, Fußballstadion Braga, Architekt: Souto de Moura (BNr. 54) [Detail 2004]

Die Tragseile des Hängedachs des Flughafenterminals Dulles International Airport von 1962 sind je Seite in einem durchlaufenden Betonbalken verankert, der auf den Köpfen der schrägen Betonpfeiler aufliegt und gleichzeitig einen Dachüberstand ausbildet (Bild 5-29). Durch die Schrägstellung der Pfeiler werden die Einspannmomente aus den am Kopfende angreifenden horizontalen Dachlasten verringert, da sowohl durch das Eigengewicht der Pfeiler, das Gewicht des Randbalkens als auch durch die vertikalen Dachlasten am Fußpunkt erhebliche Gegenmomente erzeugt werden.



Bild 5-29 Hängedach mit schrägen Pfeilern zur Ableitung der Dachlasten, Terminal Dulles International Airport, Architekt: Eero Saarinen (BNr. 78) [Saarinen 2005]

Das Hängedach des Werkhofs der Stadtwerke in Hohenems nutzt die Flügelbauten als Widerlager (Bild 5-30). An dem östlichen Dachrand werden die Lasten aus den einzelnen Zuelementen über einen in der Ebene des Hängedachs liegenden Stahl-Fachwerkträger an mehreren Punkten gesammelt und in den massiven Gebäudetrakt eingeleitet. Dort werden sie über Stahlbetonrahmen in den Baugrund abgetragen. Auf der westlichen Seite werden die vertikalen Lasten im Lagertrakt über ein Fachwerk und zweigeschossige Stützen abgetragen. Die horizontalen Anteile werden über das als Scheibe ausgebildete Dach zu vier Doppelböcken geleitet, die beidseitig der Treppenläufe angeordnet sind.

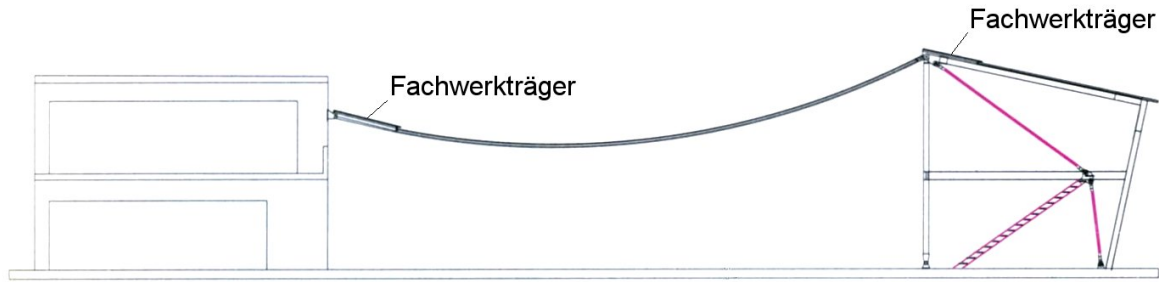


Bild 5-30 Querschnitt durch das Hängedach mit anschließenden Gebäuden, Werkhof der Stadtwerke Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Merz 2001]

Beim Saalbau-Hallenbad in Biel werden die Dachlasten über je einen als Hohlquerschnitt ausgebildeten Randträger zu den Gebäudeecken geleitet (Bild 5-31). Dort werden sie über schräg nach außen geneigte Druckpfosten in die Fundamente geführt. Mittels Zugabspannungen bzw. Gegengewichten an den jeweiligen Stirnseiten wird ein Gleichgewichtszustand hergestellt.

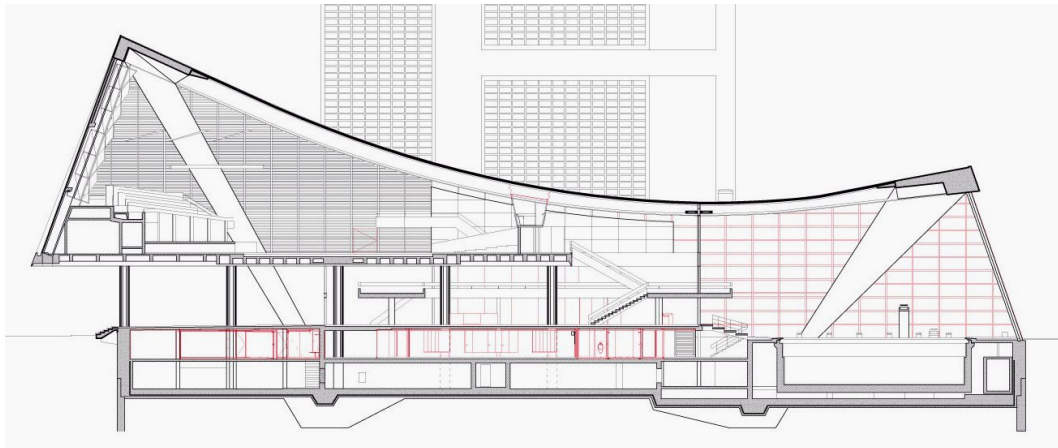


Bild 5-31 Querschnitt durch das Gebäude, Ableitung der Dachlasten über Druckpfosten und Gegengewicht (links) bzw. Zugabspannungen (rechts), Saalbau-Hallenbad Biel, Architekten: Schlup, Scascighini, Studer, Ingenieur: Stocker (BNr. 58) [Hartmann 2004]

Offene Randverankerungssysteme bieten verschiedene Vorteile. Durch die „offene“ Konstruktion ist der Lastpfad übersichtlich und leicht nachvollziehbar. Häufig besteht zudem die Möglichkeit, die Last weiterleitende Konstruktion in das Bauwerk zu integrieren bzw. zu weiteren Zwecken zu nutzen. Die offenen Randverankerungssysteme sind durch die bauliche Trennung der Tragelemente einfach herstellbar, in der Ausbildung flexibel anpassbar und stellen daher eine gut geeignete Möglichkeit zur Ableitung der Lagerkräfte unterschiedlichster Hängedächer dar.

5.4.4 Geschlossene Randverankerungssysteme

In einem geschlossenen System werden die Zügelemente des Hängedachs zwischen ein starr ausgebildetes, geschlossen um die Dachfläche herum verlaufendes Randtragwerk gespannt, so dass auf Rückverankerungselemente verzichtet werden kann. Die horizontalen Kräfte der Zügelemente werden dabei in der Ebene der Dachfläche „kurzgeschlossen“, so dass an die Last weiterleitende Konstruktion nur Vertikalkräfte abgegeben werden.

Im Randverankerungstragwerk liegen reine Druckbeanspruchungen vor, wenn der Grundriss des Hängedachs kreisrund ist, die Zuelemente dabei vom Mittelpunkt radial zum äußeren Ringträger spannen und dort verankert werden (siehe Bild 5-32). Bei gleichmäßiger Belastung sind alle Seilkräfte gleich groß. In dem äußeren Ring stellen sich infolge der einwirkenden Zugkräfte überwiegend Druckbeanspruchungen ein, ein häufig angeordneter zweiter innerer Ring wird auf Zug beansprucht. Eine maßgebende Biegebeanspruchung tritt bei ausreichend kleinem Abstand der Seilverankerungspunkte nicht auf. Die Horizontalkräfte werden somit schon in Auflagerhöhe kurzgeschlossen. Von der Unterkonstruktion sind ausschließlich die verhältnismäßig kleinen vertikalen Lagerkräfte infolge des Eigengewichts des Daches und seiner Nutzlasten (Schnee, ggf. Winddruck) aufzunehmen.

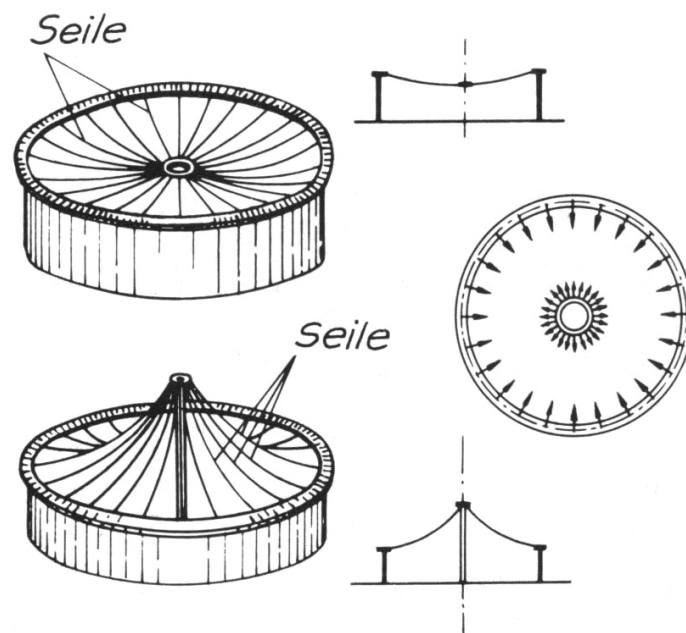


Bild 5-32 Hängedach über kreisrundem Grundriss mit innerem Zugring (oben) und mit Innenstütze (unten)
[Rabinovič 1966]

Bild 5-33 zeigt einen Bauzustand des Villita Assembly Building (1960) in San Antonio, bei dem ein geschlossenes Randverankerungssystem zum Einsatz kommt. In der Abbildung sind die stählerne Ausbildung des äußeren Druck- und des inneren Zugrings gut zu erkennen. Die umlaufenden Stützen in der Außenfassade konnten wegen der kleinen aufzunehmenden Vertikallasten trotz einer Höhe von 22,50 m sehr schlank ausgebildet werden.

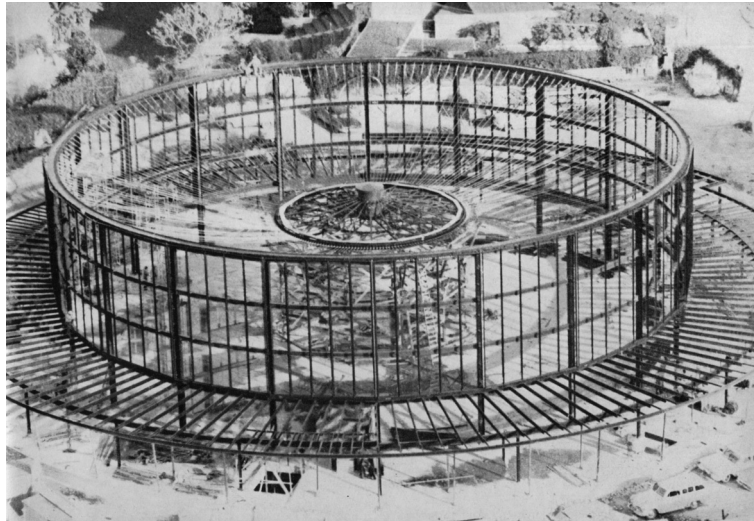


Bild 5-33 Geschlossenes kreisrundes System mit äußerem Druckring und inneren Zugring im Bauzustand, Villita Assembly Building, Architekt: O'Neil Ford (BNr. 84) [Makowski 1965]

Weicht die Grundrissform des Hängedachs vom Kreis ab, treten zusätzlich Biegemomente im äußeren Randträger auf. Bei rechteckigen Grundrissen ist die Kombination von Randträgern mit Druckgurten, die entlang der Längsseiten verlaufen und die horizontalen Kräfte mit denen der Gegenseite ausgleichen, üblich (siehe Bild 5-34). Die Ausbildung der Randträger kann entsprechend den offenen Systemen erfolgen, wobei auch hier unterschiedliche Tragsysteme zum Einsatz kommen können (siehe Bild 5-26, S. 116).

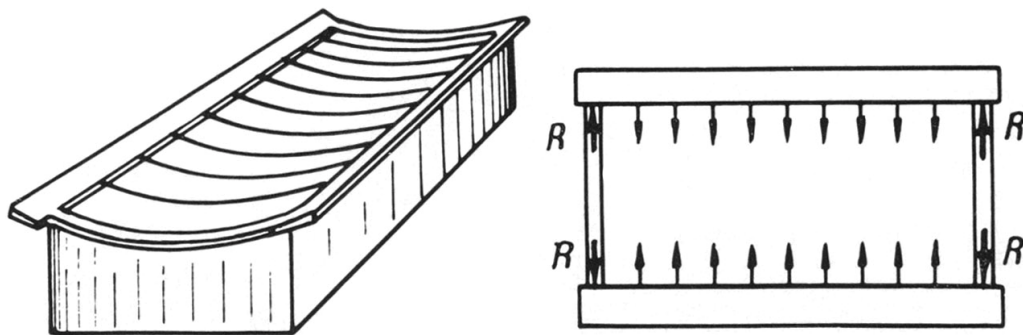


Bild 5-34 Kräfteverlauf bei geschlossenem Randverankerungssystem mit Rechteckgrundriss [Rabinovič 1966]

Da der Druckgurt aus optischen Gründen oftmals der Dachform folgend gekrümmt ausgebildet wird, ist eine kontinuierliche Unterstützung erforderlich, die ein Ausweichen des Gurtes infolge der Umlenkkräfte verhindert. Hierzu können die Fassadenstützen der Längsseiten genutzt werden, in die vertikale Druckkräfte eingeleitet werden. Als druckbeanspruchte Bauteile müssen die Druckgurte zudem gegen Knicken gesichert werden. In Bild 5-35 ist der Kräfteverlauf in einem solchen System dargestellt.

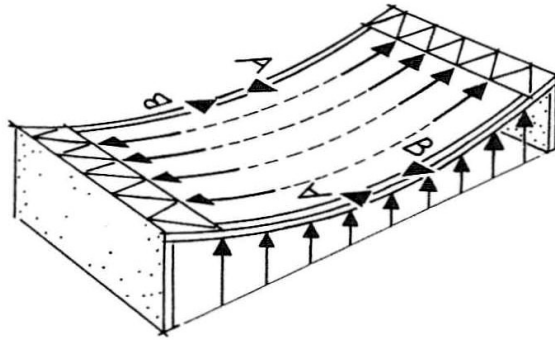


Bild 5-35 Kräfteverlauf in einem geschlossenen Randverankerungssystem über rechteckigem Grundriss mit gekrümmtem Druckbalken [Siegel 1960]

Beim Neubau der Technischen Oberschule für Energetik in Sofia werden die Dachlasten nach diesem Prinzip von massiven Randträgern zu den Längsseiten transportiert (Bild 5-36). Dort nehmen zwei der Dachform entsprechend gebogene Druckbalken, die auf jeweils acht Fassadenstützen aufgelagert sind, die Horizontallasten auf und gleichen sie auf Dachniveau aus.



Bild 5-36 Geschlossenes Randverankerungssystem über rechteckigem Grundriss, Neubau der Technischen Oberschule für Energetik Sofia, Architekt: Todorova, Ingenieur: Kostov (BNr. 63) [Kostov 1985]

Die Stirnseiten können baulich frei gehalten werden (Bild 5-37), indem der Randträger auch in vertikaler Richtung so steif dimensioniert wird, dass er die Gebäudebreite überspannt.

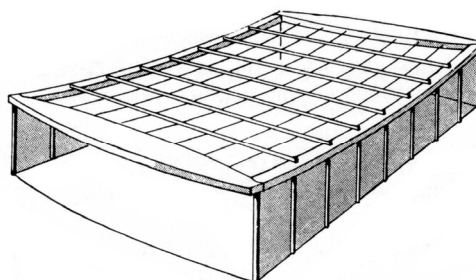


Bild 5-37 Geschlossenes Randverankerungssystem: freie Stirnseiten, Fassadenstützen entlang der Längsseiten [Otto 1954]

Bei Nutzung geschlossener Randverankerungssysteme hat die Unterkonstruktion relativ geringe vertikale Lagerkräfte aufzunehmen, wodurch geringe Wand- und Fundamentabmessungen ermöglicht werden. Auf störende Abspannungen oder Stützbocke, die zusätzlichen Raum benötigen, kann verzichtet werden. Da der Lastabtrag bei geschlossenen Randverankerungssystemen unabhängig von der Dachhöhe ist, sind diese Ausführungen besonders für hohe Gebäude geeignet. Die bauliche Ausführung der Dachkonstruktion ist im Vergleich zu offenen Randverankerungssystemen komplexer und die Lastpfade sind nicht unmittelbar ersichtlich.

5.4.5 Zwischenunterstützungen

Durch die Anordnung von Zwischenunterstützungen können die Spannweiten von Hängedächern und somit auch die auftretenden horizontalen Auflagerkräfte reduziert werden. Da bei gleichmäßiger Belastung die Größe der Horizontalkräfte am Auflager quadratisch mit der Spannweite zunimmt, bewirkt eine Halbierung der Spannweite eine Reduzierung der horizontalen Kräfte auf ein Viertel des Ausgangswertes (Bild 5-38). Die vertikalen Auflagerkräfte sind direkt proportional zur Spannweite, eine Halbierung der Spannweite halbiert somit auch die auftretenden Vertikalkräfte am Auflager (siehe Kapitel 4.6.3 und 4.6.7).

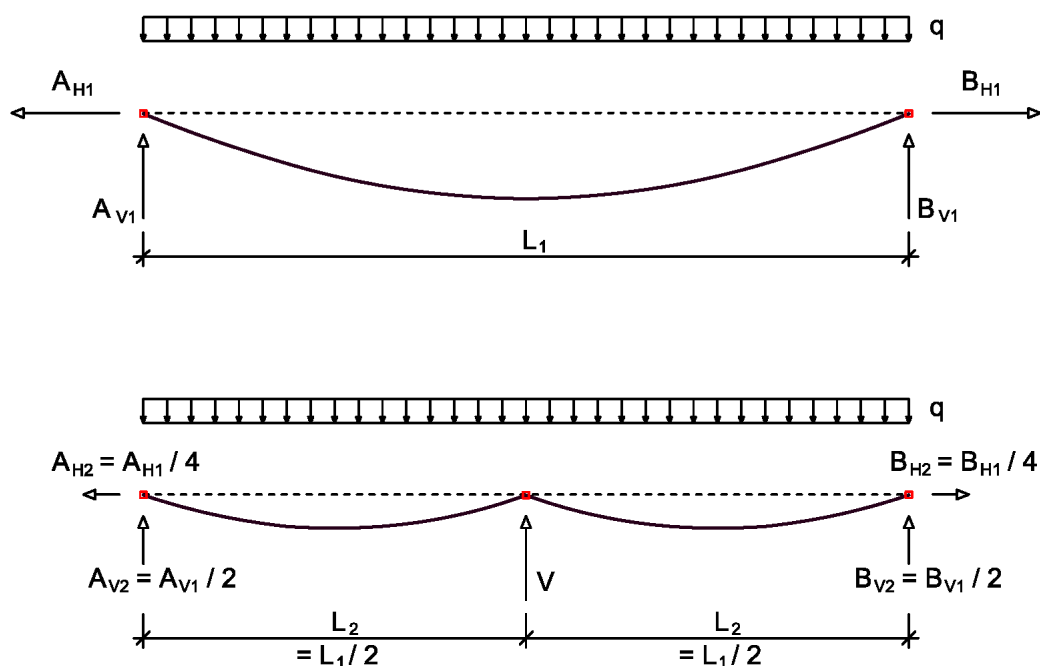


Bild 5-38 Auswirkungen einer Zwischenunterstützung

Zwischenunterstützungen können punktförmig als Stütze (ggf. mit Stützenkopfverbreiterung), als Stützbock, als Abhängungen von höheren Punkten oder linienförmig als Rahmen, Bogen (z. B. Hockey-Stadion der Yale-Universität), Bogenkreuz oder als zwischen Stützen hängendes Firstseil (z. B. 1. Sporthalle Yoyogi, Bild 5-42, S. 126) ausgebildet werden.

Die Zugbänder der Lufthansa-Wartungshalle in Frankfurt / Main werden in Hallenmitte in einem über die gesamte Hallentiefe verlaufenden Stahlbetonrahmen mit zwei Kragarmen verankert

(Bild 5-39). Der Rahmenriegel wird infolge der Eigenlasten überwiegend in vertikaler Richtung belastet. Die Ausbildung als Hohlkasten stellt eine hohe Torsionstragfähigkeit zur Aufnahme unsymmetrischer Lasten aus beiden Dachseiten sicher.

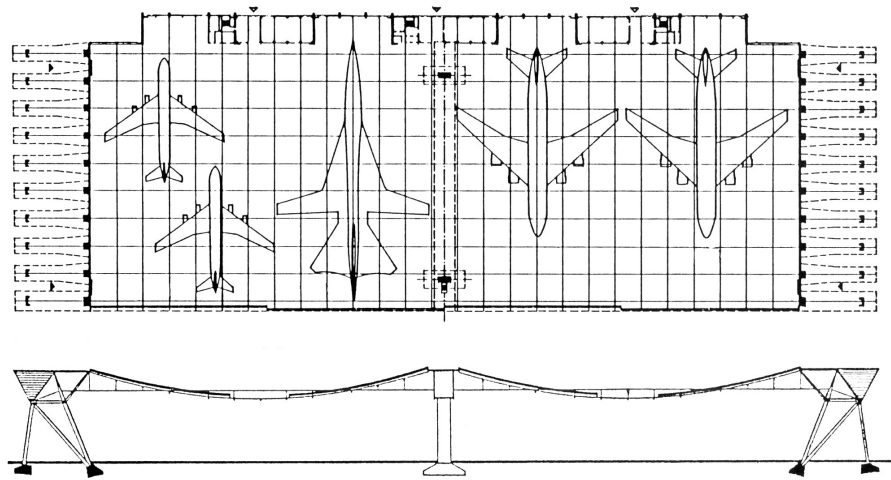


Bild 5-39 Hängedach mit Rahmen als Mittelunterstützung, Lufthansa-Wartungshalle, Architekten: Beckert und Becker, Ingenieur: Bomhard (BNr. 24) [Dechau 1990]

Bild 5-40 zeigt das Hängedach der Kirche Heilig-Geist in Essen-Katernberg. Die Mittelunterstützung wird durch einen Firstbalken gebildet, der auf den Köpfen zweier Stützböcke aufliegt. Die horizontalen Dachlasten werden in diesem Beispiel durch einen Druckbalken auf halber Höhe kurzgeschlossen.

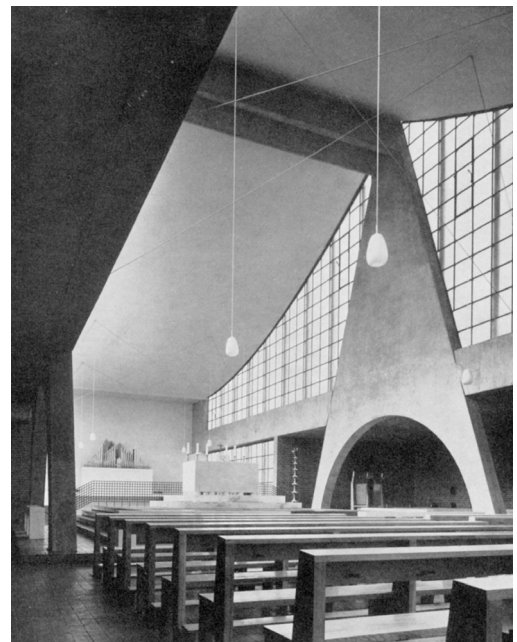
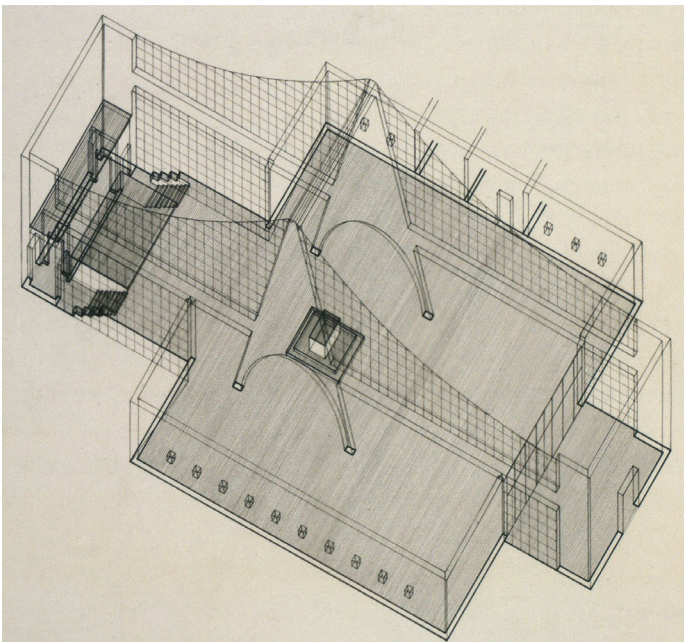


Bild 5-40 Hängedach mit Mittelunterstützung durch Firstbalken und Stützböcke, Kirche Heilig-Geist, Architekt: Gottfried Böhm (BNr. 18) [Voigt 2006] [Born 1964]

Zwischenunterstützungen bieten aus statisch-konstruktiven Gesichtspunkten viele Vorteile, schränken die Nutzung des Innenraums jedoch gegebenenfalls ein. Der verminderte Aufwand für die Endverankerung der Tragseile und die Lastweiterleitung muss daher gegen den Zusatzaufwand einer Zwischenunterstützung und die Einschränkungen in der Raumnutzung abgewogen werden.

5.4.6 Verankerung im Baugrund

Alle Bauwerkslasten sind in den Baugrund abzuleiten. Bei gewöhnlichen Hochbauten handelt es sich in der Regel um vertikale Druckkräfte, die aus dem Eigengewicht und den Nutzlasten des Bauwerks resultieren. Diese werden meist über Flachgründungen als Bodenpressung abgegeben. Bei großen Lasten bzw. wenig tragfähigem Baugrund sind Pfahlgründungen erforderlich, bei denen die Lasten über Spitzendruck oder Mantelreibung in den tragenden Baugrund eingeleitet werden.

Bei leichten Flächentragwerken sind die Lasten aus Eigengewicht sehr viel geringer als bei massiven Bauwerken. Hierbei können die größtmöglichen auftretenden Windsogkräfte die Eigenlasten sogar überschreiten, so dass eine Rückverankerung der abhebenden Kräfte im Baugrund erforderlich wird.

Bei offenen Randverankerungssystemen erfolgt der Kraftausgleich über den Baugrund. Die horizontalen Lasten werden dabei erst unterhalb der Geländeoberkante direkt über den Baugrund oder über einen zusätzlichen Druckgurt kurzgeschlossen. Bild 5-41 zeigt die Wirkung einer Fundamentplatte als Druckplatte zwischen den Außenfundamenten.

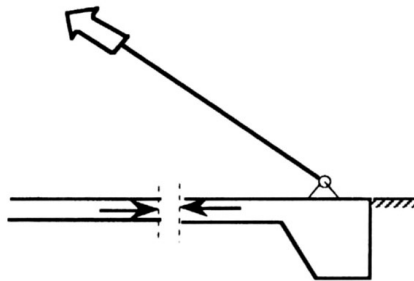


Bild 5-41 Fundamentplatte als Druckbalken zwischen den Außenfundamenten [Sandaker 1994]

Bei der 1. Sporthalle Yoyogi in Tokio (Bild 5-42) werden die Haupttragseile über Pylone gelenkt und zu den Ankerblöcken geleitet. Die Zugkräfte der Haupttragseile werden dort über das Eigengewicht des Ankerblocks und dessen Erdauflast sowie über die in horizontal verlaufenden Strebebalken wirkenden Druckkräfte abgetragen.

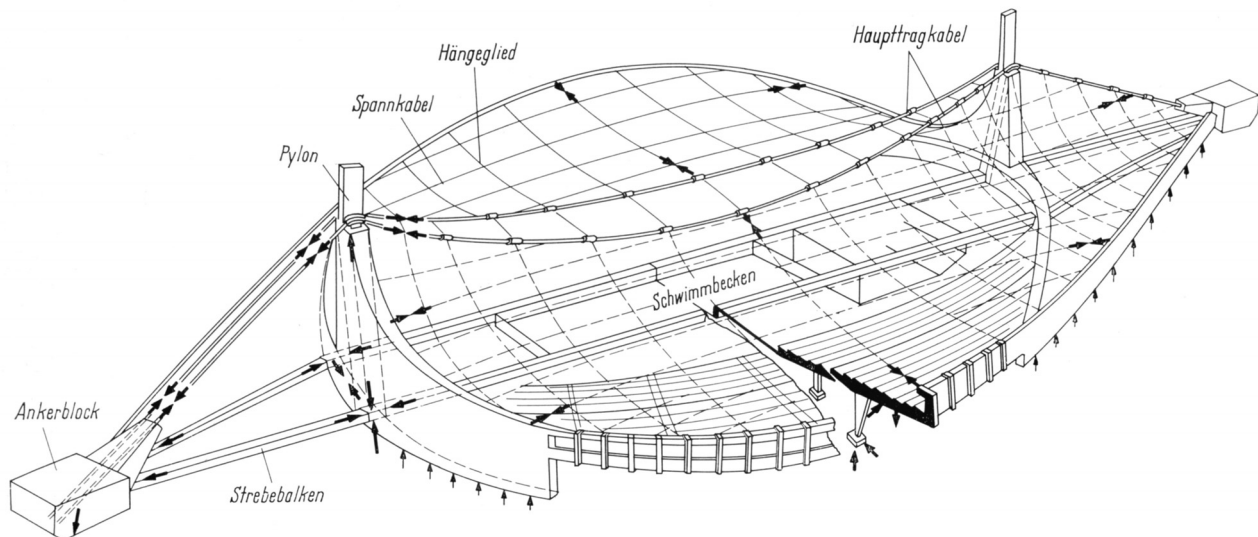


Bild 5-42 Schema des konstruktiven Systems, 1. Sporthalle Yoyogi, Architekt: Kenzo Tange, Ingenieur: Yoshikatsu Tsuboi (BNr. 98) [Tsuboi 1966]

Die auf Höhe der Aufhängepunkte wirkenden Horizontalkräfte aus dem Hängedach werden bei offenen Randverankerungssystemen typischerweise getrennt in Druck- und Zugkomponenten abgeleitet (siehe Bild 5-18 und Bild 5-19, S. 113 f.). Die Druckkomponente wird im Regelfall über Bodenpressung an den Untergrund abgegeben. Die meist schräg verlaufende Zugkomponente muss je nach Größe und Neigung der Kraft sowie den vorliegenden Bodenverhältnissen verankert werden. Hierzu stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung.

Eine einfache und sichere Methode bietet die Schwergewichtsverankerung. Hierbei kommen große Ankergewichte, wie beispielsweise Betonkörper oder Säcke, die mit Sand oder Wasser verfüllt werden, zum Einsatz. Diese können die vertikalen Zugkraftanteile bis zur Größe ihres Eigengewichts aufnehmen (Bild 5-43). Bei Säcken besteht der Vorteil, dass vor Ort vorhandenes Füllmaterial genutzt und das Gewicht genau dosiert werden kann. Säcke werden bevorzugt für Bauhelfe (Vorspannung) und für temporäre Bauten verwendet. Betongewichte können in verschiedenen Formen hergestellt und zusätzlich beschwert werden. Zur Erhöhung des Reibwiderstandes besteht die Möglichkeit, die Unterseite verzahnt auszubilden (siehe Bild 5-44).

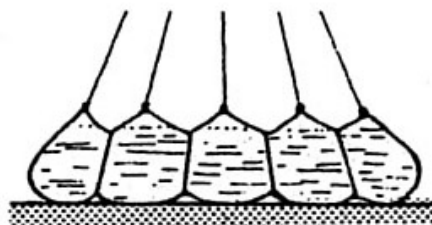


Bild 5-43 Schwergewichtsverankerung mit einzeln angehängten Wasser- oder Sandsäcken [Otto 1958]



Bild 5-44 Aufliegender Betonkörper in Quaderform (links) und mit verzahnter Unterseite (rechts) [Otto 1958]

Bei Schwergewichtsverankerungen werden die horizontalen Zugkraftkomponenten über den Reibungswiderstand des Ankerkörpers mit dem Untergrund aufgenommen. Massive Körper können zudem teilweise oder ganz in den Baugrund eingebunden werden, um zusätzlich den passiven Erddruck zu aktivieren und die Erdauflast als zusätzlichen Ballast zu nutzen (Bild 5-45). Werden Betonkörper direkt gegen den gewachsenen Baugrund betoniert, so ergibt sich eine besonders raue, reibfeste Oberfläche.

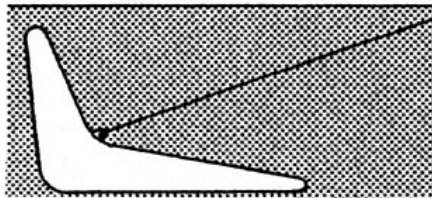


Bild 5-45 Eingegrabener Betonwinkel [Otto 1958]

Bei der Verankerung der Zugkräfte aus dem Hängedach der Westfalenhalle 4 in Dortmund wird das Gewicht des Erdkörpers über dem im 11 m Tiefe angeordneten Stahlbetonband als Gegenlast zu den zu verankernden Zugkräften genutzt (Bild 5-46). Die aus der Umlenkung des Abspannseils resultierende Druckkraft wird über einen waagerechten, unterirdischen Riegel zusammen mit der Strebendruckkraft aus dem Auflagerbock in das Hallenfundament geleitet.

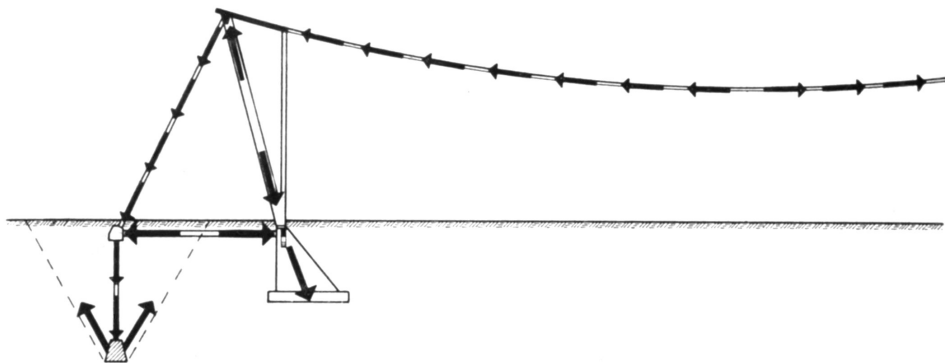


Bild 5-46 Verankerung der Zugkräfte aus dem Hängedach, Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16) [Vaessen 1959]

Eine andere Methode der Verankerung der Zugkräfte im Baugrund stellt die Verwendung von Ankern oder Pfählen dar. In diese Gruppe fallen verschiedene Verfahren bzw. Bauarten, die sich durch die Art des Einbringens (Bohrung, Rammung, Einspülung, Eingrabung, Eindrehen) und des eingesetzten Materials (Stahl, Beton, Holz) unterscheiden.

Bei der Messehalle 26 in Hannover sind die Böcke an der Nordseite unter den Schrägstützen über Stahlbeton-Rammpfähle tief gegründet, um die besonders hohen Zugkräfte entlang dieser Achse aufnehmen zu können (Bild 5-47). Für alle anderen Böcke ist eine Flachgründung ausreichend.

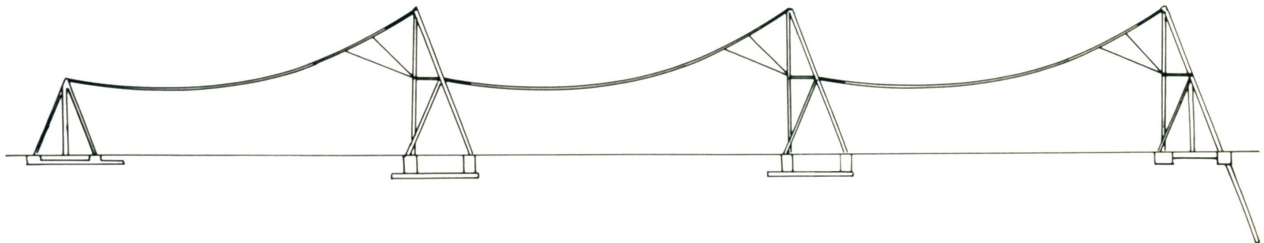


Bild 5-47 Längsschnitt mit Gründungssituation, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Bauen mit Holz 1997]

Anker und Pfähle ohne weitere Ausstattung, wie z. B. Fußausbildungen oder Ankerplatten, können gerammt, gebohrt oder eingegraben werden und weisen nur geringe Zugtragfähigkeiten auf. Zur Aufnahme größerer Zugkräfte werden Stahlrohre oder -profile vor dem Rammen mit Vorrichtungen versehen, die eine Injektion von Zementmörtel oder ähnlichem gestatten, wobei die Injektion entweder nur am Pfahlfuß (z. B. Ankernadeln) oder entlang des gesamten Schaftes (z. B. MV-Pfähle) erfolgt (Bild 5-48).

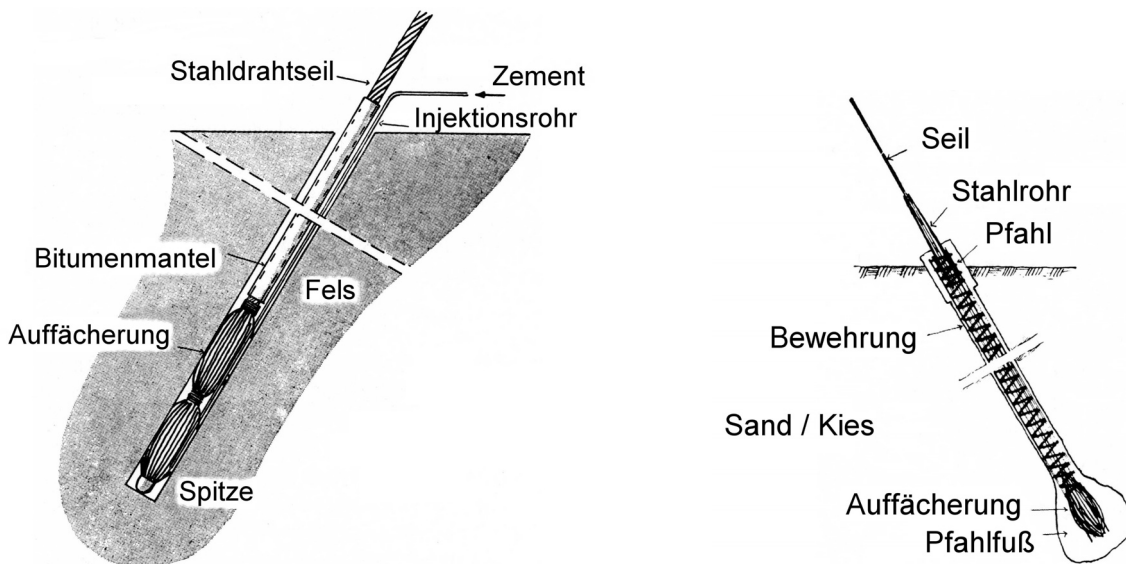


Bild 5-48 Verankerungen für große Zugkräfte [Otto 1954]

links: Injektionsanker

rechts: Zugpfahl mit Pfahlfußverbreiterung

Für untergeordnete und temporäre Konstruktionen können Anker in unterschiedlichen Ausführungen mit Gewinde oder aus gedrehtem Flachstahl genutzt werden. Letztere drehen sich beim Einschlagen von selbst in den Baugrund (Bild 5-49).

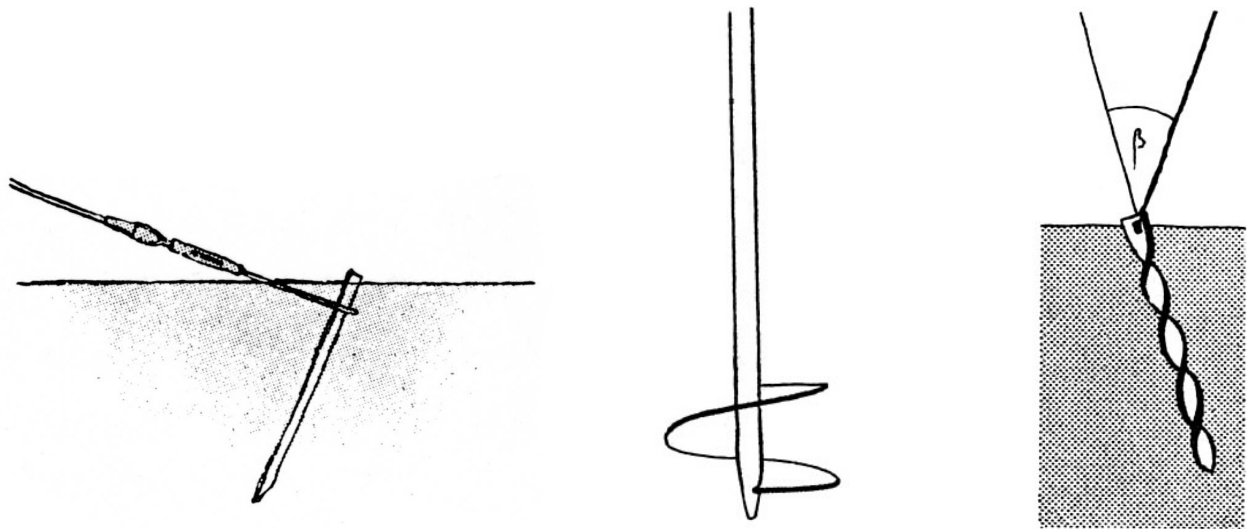


Bild 5-49 Verankerungen für untergeordnete und temporäre Konstruktionen

links: Pflockverankerung [Otto 1954]

mittig: Spiralbohrer [Otto 1958]

rechts: gedrehter Anker aus einem Bandeisen [Otto 1958]

Bei Zugpfählen ist zu beachten, dass ihre Tragfähigkeit nicht nur von den Bodenverhältnissen, sondern auch vom Winkel zwischen der angreifenden Zugkraft und der Pfahlachse abhängt, da dieser die bei der Lastabtragung wirkenden Tragmechanismen bestimmt.

Ein in Verlängerung der Seillinie angeordneter Pfahl trägt angreifende Zugkräfte allein über Mantelreibung an den umgebenden Baugrund ab. Im Pfahl treten hierbei ausschließlich Normalkraftbeanspruchungen auf. Bei einem Pfahl, dessen Achse nicht mit der Richtung der angreifenden Zugkraft übereinstimmt, erfolgt die Lastabtragung sowohl über Mantelreibung als auch über den zusätzlich geweckten Erddruck in den Baugrund. Der Pfahl erfährt dann jedoch neben den Normalkraft- auch Biegebeanspruchungen (Bild 5-50).

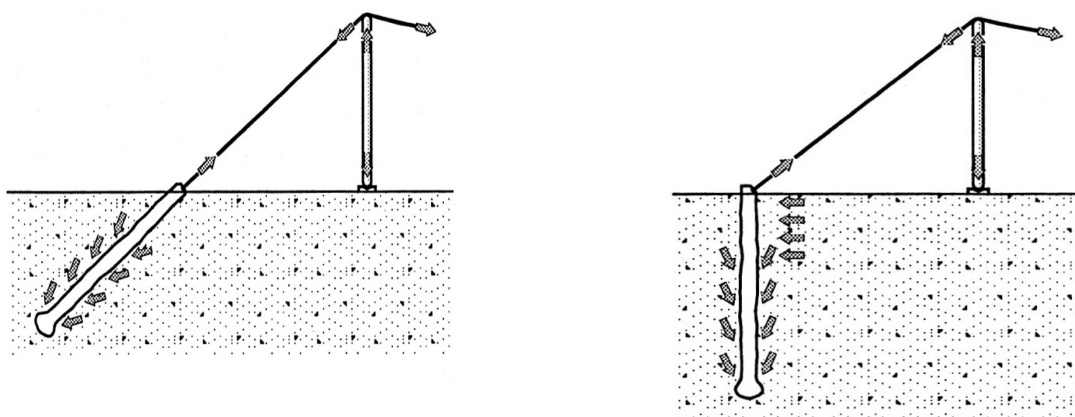


Bild 5-50 Übertragung der Zugkräfte vom Pfahl auf den Baugrund [Leicher 2002]

links: Abtrag über Mantelreibung

rechts: Abtrag über Mantelreibung und passiven Erddruck

Aufgrund der Vielfalt an leistungsfähigen Verankerungsverfahren sind selbst bei schwierigem Baugrund hohe Zugkräfte abtragbar. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Bodenverfestigung durch das Einschlagen von Blindpfählen um die eigentlichen Anker herum oder den Einsatz von Bodenverbesserungsmaßnahmen, wie z. B. das Injizieren von Zementsuspension.

Die Bestimmung der am besten geeigneten Verankerungsart hängt nicht nur von der Größe der zu verankernden Zugkräfte, sondern auch von den Bodenverhältnissen, der geplanten Lebensdauer und den Ausführungskosten ab.

6 Konstruktive Ausbildung der Dachfläche

6.1 Grundlagen

Bei der konstruktiven Ausbildung einer leichten, schlanken und verformbaren Dachfläche von Hängedächern sind spezielle Anforderungen an die Zugelemente und die Dacheindeckung gestellt. Diese ergeben sich dabei nicht nur aus den Bedingungen am fertig gestellten Bauwerk, sondern gegebenenfalls auch aus den Transport- und Montagezuständen. Die aus dem Tragverhalten leichter Hängedächer resultierenden unerwünscht großen Dachverformungen und die Schwingungsanfälligkeit müssen zudem durch geeignete konstruktive Maßnahmen auf ein unschädliches Maß begrenzt werden.

6.2 Dachaufbau

6.2.1 Allgemeines

Der Dachaufbau von Hängedächern setzt sich üblicherweise zusammen aus der tragenden Konstruktion und der Dacheindeckung. Die Besonderheit beim Hängedach liegt darin, dass die Dachhaut entweder selbst als Zugelement ausgebildet oder in die Ebene der tragenden Zugelemente integriert wird.

Flächige Tragelemente können beide Funktionen vereinen. Bei Blechdächern nimmt das Blech die Zugkräfte auf und bildet gleichzeitig die Dachhaut. Bild 6-1 zeigt beispielhaft das Blechdach vor der Hauptwache auf dem Schlossplatz in Detmold von 1836.



Bild 6-1 Blechdach vor der Hauptwache auf dem Schlossplatz in Detmold, Architekt: Ferdinand Wilhelm Brune (BNr. 14) [Graefe 1984]

Ein weiteres Beispiel für ein Hängedach mit Dachbahnen aus Blech ist das in Bild 6-2 dargestellte Dach der Getreidelagerhalle in Albany (New York, 1933).

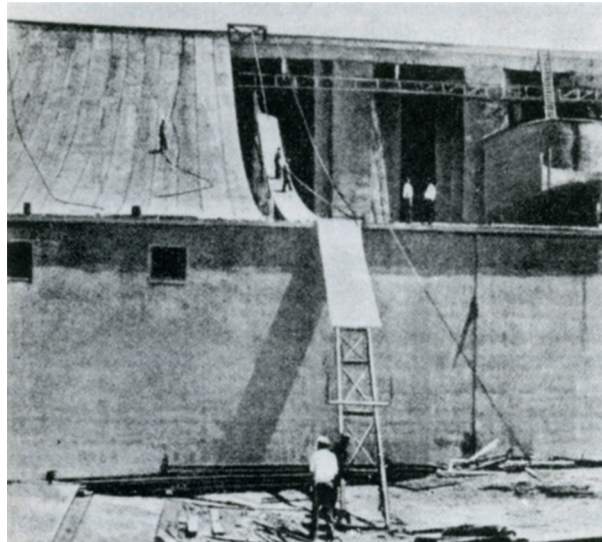


Bild 6-2 Blechdach einer Getreidelagerhalle in Albany während der Montage der Dachbahnen, Architekt: James Stewart (BNr. 73) [Otto 1954]

Auch Tafeln aus Holz oder Holzwerkstoffen sind als flächig tragende Hängedachhaut geeignet (siehe Beispiel in Bild 6-3). Holzteile werden dabei üblicherweise durch eine zusätzliche Eindeckung gegen die Witterung geschützt.



Bild 6-3 Anschließen der Furnierschichtholzbahnen, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60) [Merz 2001]

In den überwiegenden Fällen erfolgt eine Trennung zwischen den tragenden Zugelementen und der Dacheindeckung, die auf, zwischen oder auch unter diesen Elementen montiert werden kann (siehe Bild 6-4).



**Bild 6-4 Montage der Dacheindeckung auf den Flachstahlbändern, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10)
[Herzog 1996-3]**

Es ist generell anzustreben, den Dachaufbau so einfach, leicht und dauerhaft wie möglich zu gestalten. Eine leichte Ausbildung des Dachaufbaus führt zu schlankeren Verankerungskonstruktionen. Eine Ausnahme bilden so genannte „Schwergewichts-Hängedächer“, bei denen die Aussteifung gegen angreifende Windsoglasten durch das hohe Eigengewicht der Dachhaut erreicht wird (siehe Kapitel 6.3.2). Aufgrund der Verformbarkeit der Hängedächer muss der Dachaufbau zudem entsprechend flexibel ausgebildet werden, um Risse oder offene Fugen zu vermeiden. Der Anschluss angrenzender nichttragender Bauteile wie z. B. Giebelwände oder innen liegende Trennwände ist entsprechend den zu erwartenden Verformungen auszuführen.

Für die Wahl der Zugelemente und Eindeckung ist neben der Kenntnis der auftretenden Kräfte auch das genaue Wissen über das Verhalten der verwendeten Materialien wichtig. Wesentliche Kriterien hierbei sind:

- mechanische Eigenschaften
- Dauerhaftigkeit
- Nachhaltigkeit
- Handhabung
- Verfügbarkeit
- Kosten

6.2.2 Zugelemente

Die Zugelemente stellen die Haupttragelemente der Hängedächer dar und werden daher hoch beansprucht. Daher ist es erforderlich, für die Zugelemente Querschnitte und Materialien zu verwenden, die eine hohe Zugfestigkeit bei gleichzeitig möglichst geringem Eigengewicht aufweisen.

Als Maß für diese Baustoffeigenschaften kann die so genannte „Reißlänge“ betrachtet werden, die einen charakteristischen Materialkennwert darstellt. Die Reißlänge ist als diejenige Länge definiert, bei der ein frei hängender Querschnitt eines Werkstoffs durch sein Eigengewicht am Aufhängepunkt versagt. Sie kann aus der Zugfestigkeit und der Wichte als abgeleitete Größe berechnet

werden. Für den Einsatz in Zugelementen von Hängedächern eignen sich aus statischer Sicht bevorzugt Materialien mit hohen Reißlängen. In Tabelle 4-1 sind Wichte, mittlere Zugfestigkeit und Reißlänge einiger ausgesuchter Materialien aufgelistet.

Tabelle 6-1 Wichte, mittlere Zugfestigkeit und Reißlänge verschiedener Materialien

Material	Wichte [kN/m³]		mittlere Zugfestigkeit [N/mm²]		Reißlänge [km]	
	von	bis	von	bis	von	bis
Normalbeton C12/15		24,0		1,6		0,07
Normalbeton C50/60		24,0		4,1		0,17
Stahlfaserbeton ¹⁾	25,0	25,0	0,3	2,4	0,01	0,10
Nadelholz ²⁾	3,6	6,9	68	107	14,7	23,8
Laubholz ²⁾	5,4	11,2	82	215	12,6	21,7
Baumwolle	15,1	15,4	287	800	19,0	51,9
Gusseisen mit Lamellengraphit	71,0	73,0	100	450	1,4	6,2
Gusseisen mit Kugelgraphit	71,0	72,0	400	900	5,6	12,5
Stahlguss	78,5	78,5	380	1100	4,8	14,0
Baustahl S235	78,5	78,5	320	510	4,1	6,5
Baustahl S355	78,5	78,5	450	680	5,7	8,7
Edelstahl	79,2	79,6	500	730	6,3	9,2
Bewehrungsstahl BSt 500		78,5		550		7,0
Spannstahl St 1570/1770		78,5		1770		22,5
Aluminium, gegossen / gewalzt	27,0	27,0	90	230	3,3	8,5
Aluminium, legiert	27,8	27,8	410	490	14,7	17,6
Glas	24,9	24,9	30	85	1,2	3,4
Acrylglas PMMA ("Plexiglas")	11,7	12,0	50	77	4,3	6,4
Teflon PTFE	21,5	22,0	25	36	1,2	1,6
GFK ³⁾	15,0	18,0	80	240	5,3	13,3
CFK ³⁾		16,0	1350	2800	84,4	175,0

¹⁾ aus Normalbeton, nach DAfStb-Richtlinie

²⁾ parallel zur Faser; Gewicht bei mittlerer Holzfeuchte von 15%

³⁾ in Faserlängsrichtung

Es lassen sich drei Hauptmaterialgruppen von Zugelementen für Hängedächer unterscheiden:

- Metalle
- Holz und Holzwerkstoffe
- Faserverstärkte Kunststoffe

Die Materialien können sowohl als flächige (z. B. Bleche, Platten) als auch – wie im Folgenden beschrieben – als linienförmige Elemente zum Einsatz kommen. Nachfolgend werden die Ausbildungen von Zugelementen dieser drei Hauptmaterialgruppen näher betrachtet.

Metalle

Eisenketten

In England wurden Anfang des 19. Jahrhunderts bei Hängebrücken Zugelemente verwendet, die aus gusseisernen Flacheisen bestanden, die durch Bolzen verbunden wurden. Aus diesen Zugelementen entwickelten sich die Eisenketten, die dem Material entsprechend hohe Festigkeiten erreichten. Eisenketten wurden in der Folge auch im Hochbau als Zugelement eingesetzt. Bild 6-5 zeigt den Entwurf einer Eisenkette für das Hängedach eines Theaters.

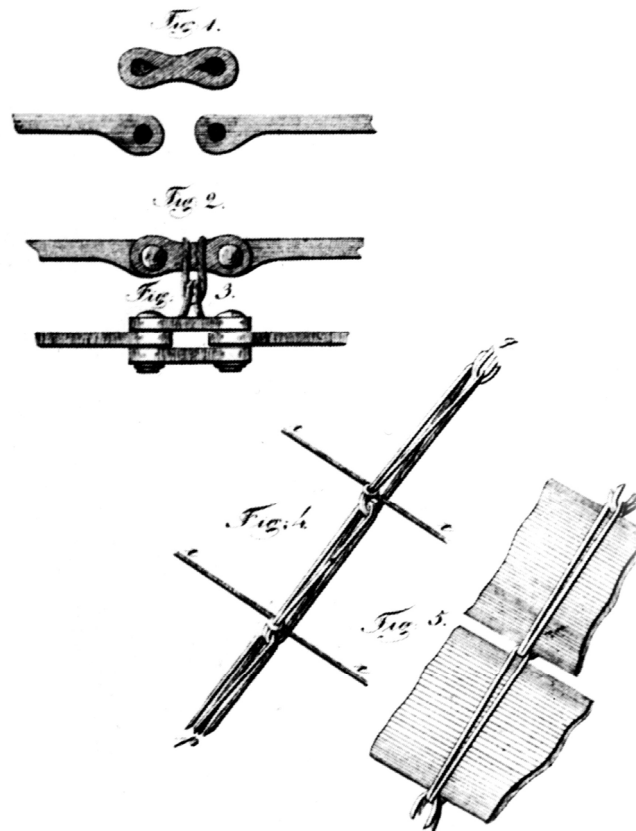


Bild 6-5 Eisenketten gemäß eines Entwurfs für ein Theater mit eisernem Hängedach (1824),
Ingenieur: Friedrich Schnirch [Graefe 1989]
Fig. 1,2,3: Aufbau der Haupt- oder Firstkette
Fig. 4,5: Aufbau der Sparrenketten mit Eindeckung

Beim Hängedach des Wohnhauses in Banská Bystrica verwendete Schnirch für die Tragkonstruktion Flacheisen (10 x 40 mm), deren Enden mit Ösen bzw. Nocken versehen und gelenkig mit Bolzen verbunden wurden (siehe Bild 6-6).



Bild 6-6 Dachuntersicht mit Eisenketten-Zugelementen, Wohnhaus in Banská Bystrica (Neusohl) (BNr. 68)
[Ferjenčík 1992]

Ein Nachteil von Ketten besteht jedoch darin, dass bei Bruch eines einzelnen Gliedes die gesamte Kette als Zugelement ausfällt. Daher wurden Ketten im Weiteren zunehmend durch Seile verdrängt.

Stahlseile

Stahl weist im Vergleich zu Gusseisen eine besonders hohe Zugfestigkeit auf. Er ist recycelbar und aufgrund der geringen erforderlichen Querschnittsabmessungen trotz hoher Materialkosten wirtschaftlich einsetzbar.

Stahldraht ist hochfest und wird bei der Herstellung gewalzt, wärmebehandelt und anschließend entweder kalt gezogen oder kalt gewalzt. Die Drahtdurchmesser liegen typischerweise zwischen 3 und 7 mm. Aus vielen einzelnen Drähten wird durch Verseilung oder Bündelung ein im Hoch- und Ingenieurbau verwendetes Seil. Durch die vielen Einzeldrähte, die rund, z-förmig, flach, oval usw. ausgebildet sein können, wird die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtquerschnitts minimiert. Aufgrund der Verseilung weisen Stahldrahtseile einen geringeren mittleren E-Modul und eine niedrigere Tragfähigkeit als der Ausgangsdraht auf.

Seile weisen bei Erstbelastung eine erhöhte Dehnfähigkeit auf, die als „Seilreck“ bezeichnet wird. Der Seilreck führt zu einer plastischen Längung und damit verbunden zu einer Querkontraktion. An Verankerungsstellen kann es daher gegebenenfalls zu einer Lockerung von Seilschellen kommen. Durch ein „Vorrecken“ der Seile kann diese Verformung weitgehend vermieden werden.

Für Trag- und Abspannseile können unterschiedliche Seiltypen verwendet werden:

- offene Spiralseile
- verschlossene Spiralseile
- Rundlitzenseile

Weiterhin besteht die Möglichkeit, Zugglieder aus Spannstählen, Bündel aus parallel zur Bündelachse verlaufenden Spanndrähten, Spannlitzen oder Spannstäben auszuführen (Bild 6-7).

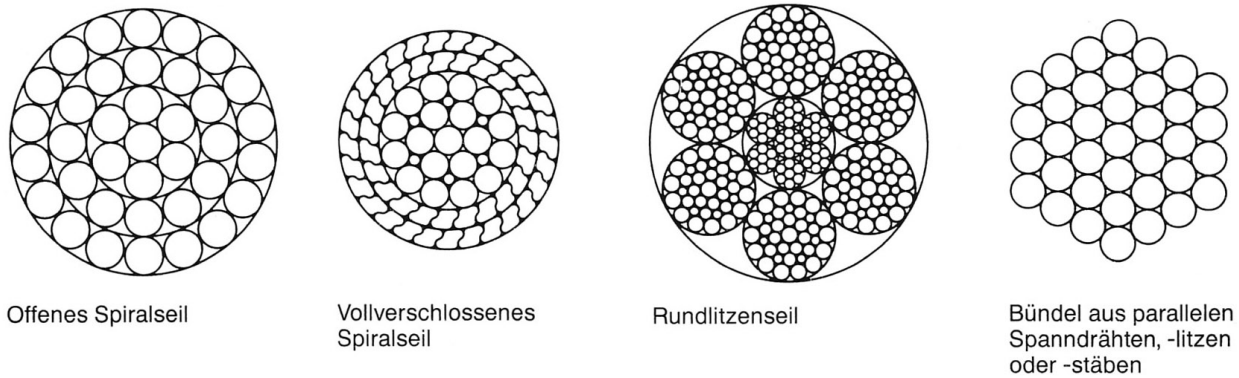


Bild 6-7 Querschnitte hochfester Zugglieder [Peil 2000]

Offene Spiralseile werden nur aus Runddrähten meist gleichen Durchmessers gefertigt. Die Runddrähte sind in einer oder in mehreren Lagen um einen Kerndraht verseilt. Da der Korrosionsschutz bei dieser Konstruktionsart schwierig ist, werden bevorzugt dicke, verzinkte Drähte eingesetzt. Offene Spiralseile werden verwendet, wenn an den Korrosionsschutz und die Dehnsteifigkeit nur mäßige Anforderungen gestellt werden. Typische Durchmesser liegen zwischen 5 mm und 40 mm.

Vollverschlossene Spiralseile bestehen aus einem Kerndraht und einer oder mehreren Lagen von Runddrähten. Die äußeren Drahtlagen bestehen aus Formdrähten, in der Regel werden „Z-Drähte“ genutzt. Die Formdrähte werden unter Längslast aufeinander gepresst. Die ineinander greifenden Profile bilden eine glatte, geschlossene Oberfläche, wodurch ein besserer Korrosionsschutz erreicht wird. Verschlossene Seile haben einen höheren Füllungsgrad und damit eine größere Dehnsteifigkeit, sind infolge großer erforderlicher Biegeradien aber schwerer zu handhaben.

Rundlitzenseile sind mehrfach verseilte Konstruktionen. Um eine Mittellitze werden weitere Lagen fertiger Litzen geschlagen. Rundlitzenseile werden wegen ihrer großen Verseilverluste, der geringen Dehnsteifigkeit und des schwierigen Korrosionsschutzes im Bauwesen nur in Ausnahmefällen verwendet.

Unter Paralleldrahtbündeln versteht man parallel aneinander gefügte Einzeldrähte, die durch Klemmen oder durch Hüllrohre in Form gehalten werden. Bündel aus Drähten oder Litzen können für sehr große Traglasten und Längen hergestellt werden. Paralleldrahtbündel weisen gegenüber Seilen höhere Dehnsteifigkeiten und Ermüdungsfestigkeiten auf.

Neben den rein metallischen Stahlseilen werden auch solche mit einem Kern aus organischen oder synthetischen Fasern hergestellt. Sie sind biegeweicher, weisen aber geringere Dehnsteifigkeiten auf. Daher sind sie für Zugelemente von Hängedächern weniger geeignet. Seile, die ausschließlich aus künstlichen (Perlon) oder natürlichen Fasern bestehen, können vorteilhaft in temporären Bauten genutzt werden, da sie zwar leicht und günstig, aber nicht dauerhaft ausreichend dehnsteif und witterungsbeständig sind.

Stahlseile bieten verschiedene Vorteile bei der Anwendung als Zugelemente in Hängedächern. Hierzu zählen die möglichen großen Lieferlängen bei geringem Transportaufwand, die feinen

Durchmesser- und Tragkraftabstufungen, der geringere Stahlverbrauch und die höhere Biegsamkeit gegenüber Stabquerschnitten. Als Nachteile gelten das schwer erfassbare Dehnverhalten und der höhere Verankerungsaufwand gegenüber Stäben.

Verschlossene Spiralseile sind wegen ihres hohen E-Moduls, der erfassbaren Dehnungen und des besseren Korrosionsschutzes sehr gut für den Einsatz in Hängedächern geeignet. Litzenseile können bei geringeren Abmessungen und Kräften oder weniger dehnungsempfindlichen Seiltragwerken vorgesehen werden.

Stahlseile sollten vor ihrem Einbau vorgereckt und auf das geometrisch exakte Maß abgelängt werden. Auch das Anbringen von Endverankerungen oder Verbindungselementen (siehe Kapitel 7.2), wie z. B. Seilschellen oder Spannschlössern, kann bereits im Werk vorgenommen werden, um auf der Baustelle die Abläufe zu vereinfachen.

Bild 6-8 zeigt die Stahlseile des Maison de la Culture in Firminy mit ihrer Verankerung im Bauzustand, in Bild 6-9 sind die nur teilweise mit einer Eindeckung versehenen Stahlseile des Fußballstadions in Braga zu sehen.

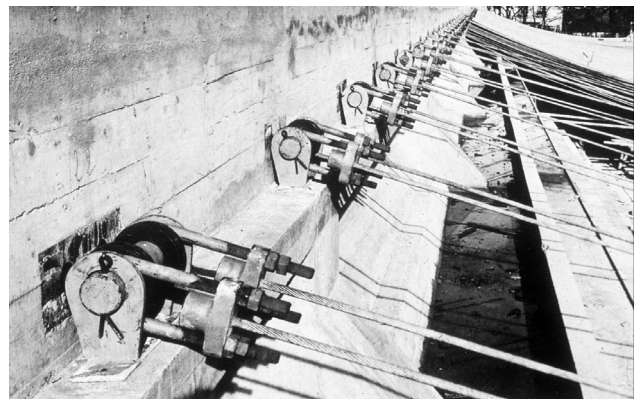


Bild 6-8 Hängedach mit Stahlseilen im Bauzustand, Maison de la Culture Firminy, Architekt: Le Corbusier (BNr. 53) [Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig]

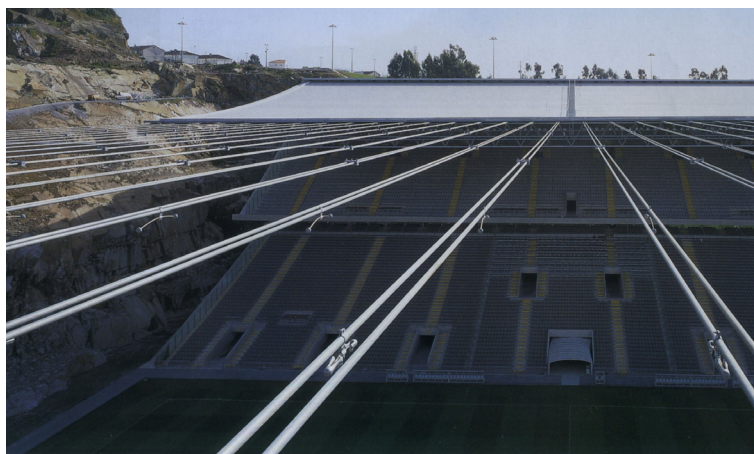


Bild 6-9 Draufsicht auf die Stahlseile ohne und mit Eindeckung, Fußballstadion Braga, Architekt: Souto de Moura (BNr. 54) [Detail 2004]

Spannglieder

Die Zügelemente von Hängedächern können aus Spanngliedern bestehen. Hierbei werden Einstabspannglieder oder Bündelspannglieder, die sich aus Litzen oder Drähten zusammensetzen, genutzt. Einstabspannglieder (Bild 6-10) kommen bereits in verschiedenen Hängedächern zum Einsatz. Aufgrund des begrenzten Durchmessers sowie der Lieferlängen ist ihre Anwendung jedoch auf mittlere Spannweiten beschränkt.

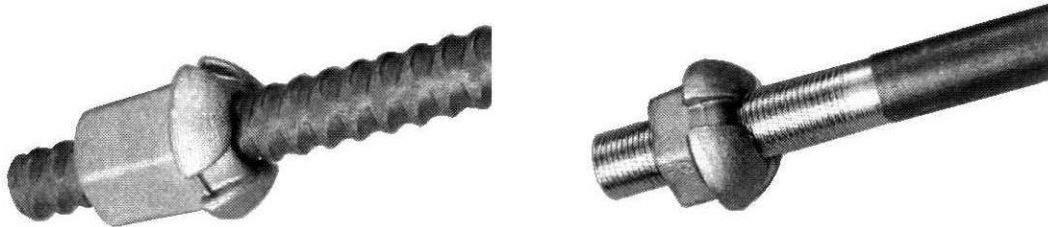


Bild 6-10 Einstabspannglieder aus geripptem und glattem Spannstahl [Kollegger 2004]

Bündelspannglieder bestehen aus mehreren Spanndrahtlitzen (Bild 6-11) und sind in großer Länge sowie für hohe aufzunehmende Kräfte verfügbar. Wegen ihrer starken Korrosionsgefährdung sollten sie nicht offen verlegt, sondern stets in Beton oder auszupressenden Hüllrohren eingebaut werden.

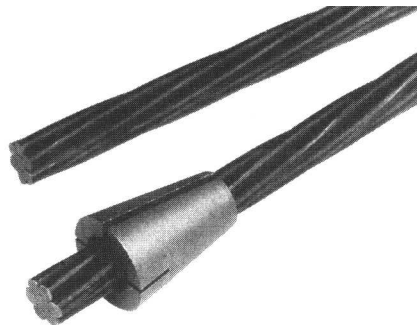


Bild 6-11 Spanndrahtlitze mit Verankerungskeil [Kollegger 2004]

Bild 6-12 zeigt das Dach der Sporthalle Augsburg während des Verlegens der Beton-Fertigteilplatten auf hochfesten Spanngliedern. Nach dem Ausrichten der Spannseile wurden die Fugen zwischen den Fertigteilen ausbetoniert, die Spannglieder gespannt und Mörtel eingepresst.

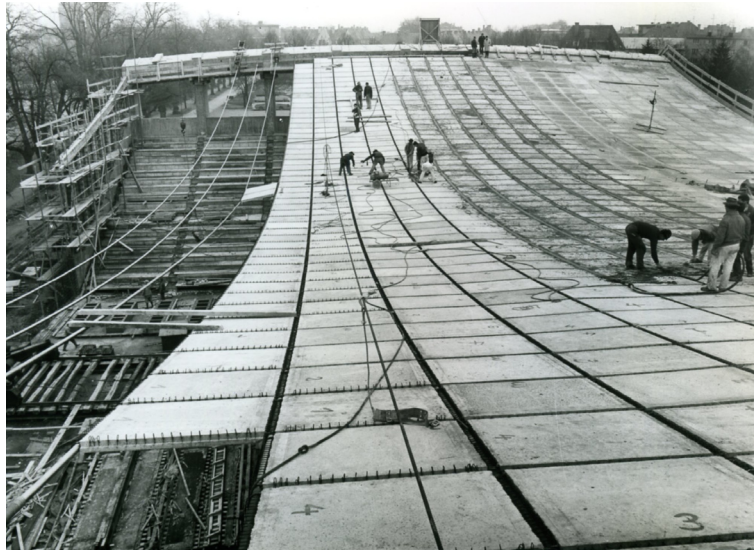


Bild 6-12 Dachfläche während des Eindeckens mit Fertigteil-Elementen auf Spanngliedern des Typs BBRV-85, Sporthalle Augsburg, Architekt: Hugo Gall (BNr. 37) [Bild-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig]

Profilstäbe

Profilstäbe sind in Form von Band-, Rund- oder Walzquerschnitten in schlanken, d. h. relativ biegeweichen Abmessungen für Zügelemente in Hängedächern geeignet. Aufgrund der Fertigung der Profilstäbe aus Baustahl ist der Materialeinsatz recht hoch. Beispiele für den Einsatz von Profilstählen bei Hängedächern zeigen Bild 6-13 und Bild 6-14.



Bild 6-13 Montage der Stahlhängebänder 60 x 40 mm aus Baustahl S 355, Römertherme Baden, Architekten: Nemetz, Junger, Weber, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 66) [Schober 2003]



Bild 6-14 Flachstahlbänder 40 x 60 mm mit Glaseindeckung, Bahnhofsvordach Ulm, Architekten: Jauss + Gaupp, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 36) [Bögle 2005]

Holz und Holzwerkstoffe

Auch Holz weist eine sehr große Reißlänge von 12,6 km bis 23,8 km auf und ist daher als Baustoff für Zuelemente in Hängedächern geeignet. Der Einsatz von Holz kann dabei in Form von Holzwerkstoffplatten, in runden oder eckigen Vollholzquerschnitten oder in Brettschichtholzbändern erfolgen. In Bild 6-15 und Bild 6-16 sind verschiedene Beispiele für den Einsatz von Holz-Zuelementen dargestellt.

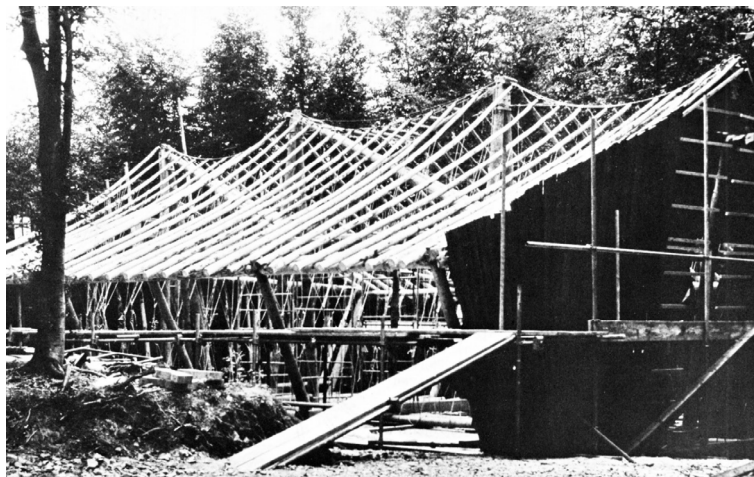


Bild 6-15 Verwendung von Firstseil und Rundhölzern als Hängezugbänder, Hooke Park College, Architekten: Ahrends, Burton, Koralek mit Frei Otto, Ingenieur: Happold (BNr. 40) [Otto 1985]

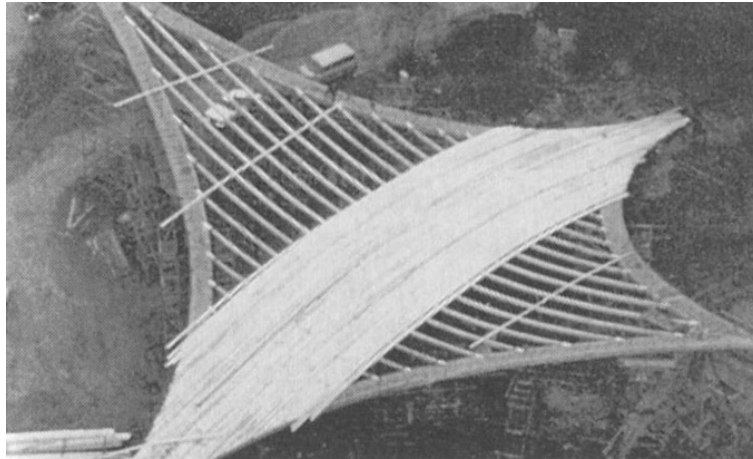


Bild 6-16 Holzrippen 20 x 20 cm mit Bretterschalung, Dach für die Bundesgartenschau Dortmund (1969), Architekten: Minke, Behnisch, Ingenieur: Natterer (BNr. 17) [Halasz 1996]

Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe sind Verbundwerkstoffe, die aus verschiedenen Fasermaterialien und Kunststoffen bestehen. Ihre Eigenschaften werden durch die Einzelkomponenten und ihr Zusammenwirken bestimmt. Die Fasern gewährleisten dabei die Tragfähigkeit und Steifigkeit, der Kunststoff stabilisiert die Form und schützt die Fasern vor UV-Einstrahlung sowie aggressiven Medien.

Der Kunststoff bestimmt das äußere Erscheinungsbild des Verbundwerkstoffs. Durch Zugabe verschiedener Zusätze können bestimmte Materialeigenschaften wie beispielsweise ein erhöhter Brandwiderstand erreicht werden. Faserverbundkunststoffe sind üblicherweise als „normal entflammbar“ (Brandschutzklasse B2 gemäß DIN 4102) einzustufen. Je nach verwendetem Harz und Zusatzstoff sind aber auch die Brandschutzklassen B1 oder sogar A2 erreichbar.

Faserverstärkte Kunststoffe spielen in der Luftfahrt- und Automobilindustrie eine bedeutende Rolle, da sie hohe Festigkeiten in Faserrichtung mit geringem Gewicht und hoher Beständigkeit vereinen. Im Bauwesen werden faserverstärkte Kunststoffe bisher nur selten in tragenden Konstruktionen eingesetzt. Zu den im Bauwesen gebräuchlichsten Verbundwerkstoffen gehören glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) und kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK).

Glasfasern (Bild 6-17) haben eine hohe Zugfestigkeit (siehe Tabelle 6-1, S. 134) und sind relativ günstig. Kohlenstofffasern weisen im Vergleich zwar deutlich bessere mechanische Eigenschaften auf, werden aufgrund ihrer hohen Kosten aber seltener eingesetzt. Sie erreichen sehr hohe Reißlängen von 84 km bis 175 km, die oberhalb derer von Stahl liegen. Als Kunststoffe werden duroplastische Harze (auch Reaktions- oder Gießharz) verwendet, da sie besonders widerstandsfähig gegenüber Umwelteinflüssen sind.



Bild 6-17 Maschinelle Produktion von Glasfasern [Knippers 2010]

Der Einsatz leistungsfähiger faserverstärkter Kunststoffe erfolgt im Bauwesen bisher überwiegend bei Verstärkungselementen für bestehende Bauteile. Als CFK-Litzen oder -Seile finden sie auch vereinzelt Anwendung als Vorspannelemente im Spannbeton-Brückenbau.

Über die bisherigen Anwendungen hinaus bieten faserverstärkte Kunststoffe ein großes Potential bei der Nutzung als Zuelemente. Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in Spannbänderbrücken, bei denen die Tragwirkung wie in Hängedächern ausschließlich über die Hauptzugtrag-elemente gewährleistet wird, ist aufgrund der hohen Zugfestigkeit ebenfalls sinnvoll, jedoch derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Am Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Massivbau der TU Berlin wurden im Jahr 2006 Kohlenstofffaser-Lamellen als Primärtragelemente für eine Spannbänderbrücke getestet [Schlaich 2007].



Bild 6-18 Versuchs-Spannbänderbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen (links) und Belastungstests (rechts), TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen [Schlaich 2007]

Mit dem Versuch (siehe Bild 6-18) konnte die grundsätzliche Eignung der Zugelemente aus CFK bestätigt werden. Zur Anwendung der innovativen Bauweise sind jedoch noch Detaillösungen zur Verankerung der Zugglieder sowie Methoden zur Dämpfung gegen personenerregte Schwingungen zu erarbeiten.

Hängedächer zeichnen sich genau wie Spannbandbrücken dadurch aus, dass sie leicht, weit gespannt und die Haupttragelemente ausschließlich zugbeansprucht sind. Daher ist der Einsatz von Zuggliedern aus GFK oder CFK für zukünftige Hängedächer eine viel versprechende, innovative Alternative.

6.2.3 Dacheindeckung

Die Dacheindeckung bildet den oberen Raumabschluss von Gebäuden. Je nach Gebäudenutzung bestehen unterschiedliche bauphysikalische Anforderungen an die Dachhaut.

Dacheindeckungen für Hängedächer können nach folgenden Kriterien unterschieden werden:

- Funktion
- Tragverhalten
- Gewicht
- Bauablauf
- Material

Weiterhin ergeben sich funktionelle Unterschiede zwischen Eindeckungen, die nur als Gebäudehülle dienen, und solchen, die zusätzlich auch zum Lastabtrag in Dachlängsrichtung herangezogen werden. Eine Dachhaut, die zugleich als Zugelement wirkt, muss gleichzeitig flächig und zugfest in Spannrichtung sein. Eindeckungen, die nur als Dachhaut eingesetzt werden, können auf, unter oder zwischen lastabtragenden Zuggliedern angeordnet werden und müssen nur deren Abstand überspannen. Die Eindeckung bewirkt hierbei eine Verteilung der Lasten in Querrichtung. Mit einer vorgespannten, schubsteifen Eindeckung kann in der Dachfläche sogar eine Schalentragwirkung erreicht werden.

Das Gewicht der Eindeckung kann entsprechend den statischen und konstruktiven Erfordernissen von sehr leicht (etwa $0,1 \text{ kN/m}^2$) bis hin zu schwer ($> 2,0 \text{ kN/m}^2$) gewählt werden (vergleiche auch Tabelle 5-1, S.99). Leichte Eindeckungen sind aus statischer Sicht erstrebenswert. Sie sind günstig zu transportieren und mit geringem Aufwand bzw. ohne schweres Gerät zu montieren. Geeignet sind Materialien geringer Wichte und / oder dünne Querschnitte wie beispielsweise Bleche. Schwere Dacheindeckungen, z. B. aus Beton, bieten Vorteile hinsichtlich der Verformungsempfindlichkeit und des dynamischen Verhaltens, weisen jedoch gewichtsbedingte Nachteile bei der Montage auf und erfordern einen höheren Aufwand bei der Last weiterleitenden Konstruktion.

Nach dem Grad der Vorfertigung können zwischen im Werk vorgefertigten Elementen, Eindeckungen, die vor Ort am Boden vormontiert oder solchen, bei denen die Fertigung direkt in der Höhe

erfolgt, unterschieden werden. Die Dacheindeckung wird im Allgemeinen bevorzugt in Form von fertigen Elementen auf die Baustelle geliefert, wo sie mit Hilfe eingebauter Anschlusselemente in kurzer Zeit montiert werden kann. Die Vorfertigung im Werk ist witterungsunabhängig, maschinell möglich und daher effizient und passgenau. Bei Verwendung von Fertigteilen kann weitestgehend auf aufwendige Hilfskonstruktionen wie Gerüste oder Schalungen verzichtet werden. Der gleiche Vorteil ergibt sich, wenn möglichst viele Montageschritte bereits am Boden ausgeführt und die Konstruktion erst anschließend auf Dachhöhe angehoben wird. Bestimmte Dachaufbauten werden bauartbedingt erst direkt in Dachhöhe gefertigt, beispielsweise Dächer in Ortbetonbauweise.

Ein entscheidender Aspekt bei der Ausführung der Dacheindeckung ist das Baumaterial. Dabei stehen zur Auswahl:

- Holz und Holzwerkstoffe
- Beton
- Metalle
- Glas
- Kunststoffe

Die Wahl des Baumaterials bestimmt insbesondere die bauphysikalischen Eigenschaften des Daches, das Gewicht, die Funktion und das Tragverhalten der Eindeckung, sowie Möglichkeiten zur Vorfertigung und den Einbau. Den Anforderungen entsprechend werden die Dachquerschnitte durch Wärmedämmung, Dampfsperre, Dachhaut etc. ergänzt.

Wird die Dacheindeckung mit deutlichem Abstand von den Zugelementen angeordnet, so weicht die Dachhautebene von der Ebene der tragenden Zugelemente ab. Es kann somit nicht mehr von einem Hängedach gesprochen werden. Vielmehr handelt es sich in diesen Fällen um ein abgehängtes oder aufgeständertes Dach.

Holz und Holzwerkstoffe

Dacheindeckungen aus Holz oder Holzwerkstoffen sind sehr flexibel einsetzbar. Als flächige Elemente vereinen sie sowohl zugkraftabtragende als auch raumabschließende Funktion. In der Ausführung werden lange Holzwerkstoffbahnen vorgefertigt angeliefert, in die endgültige Position eingehoben und dort mit vormontierten Anschlussstücken befestigt. Bild 6-19 und Bild 6-20 zeigen beispielhaft das Einheben eines Elements der Dachbahn beim Werkhof der Stadtwerke Hohenems. Die in Bild 6-20 im Querschnitt dargestellten gefälzten Plattenstöße werden erst nach dem Einhängen und Justieren schubfest miteinander vernagelt.

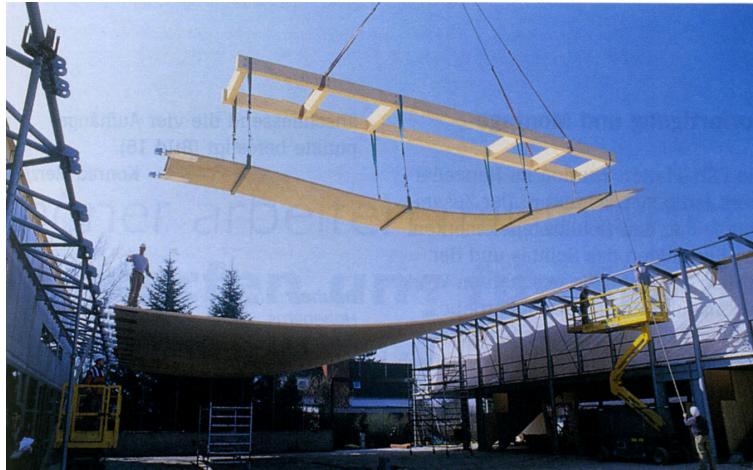


Bild 6-19 Einheben der Dachbahnen, Werkhof der Stadtwerke Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Merz 2001]

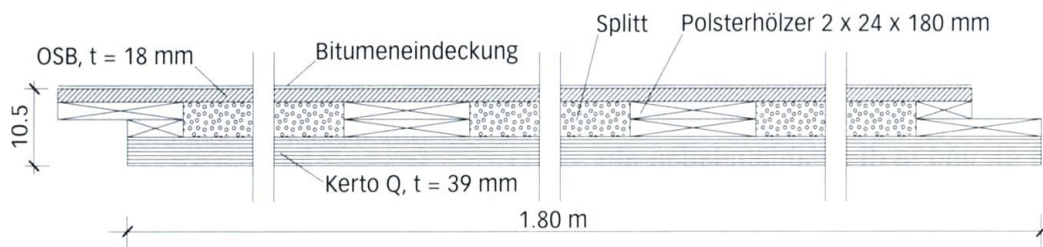


Bild 6-20 Querschnitt durch ein Dachelement [Merz 2001]

Bei verschiedenen Hängedächern kommen Fertigteilenelemente aus Holz und Werkstoffplatten zum Einsatz, die im Werk vorgefertigt und mit Anschlusskonstruktionen versehen werden und vor Ort in bereits gespannte Zugglieder eingehängt werden können. Bild 6-21 und Bild 6-22 zeigen diese Anwendung am Beispiel der Messehalle 26 in Hannover.

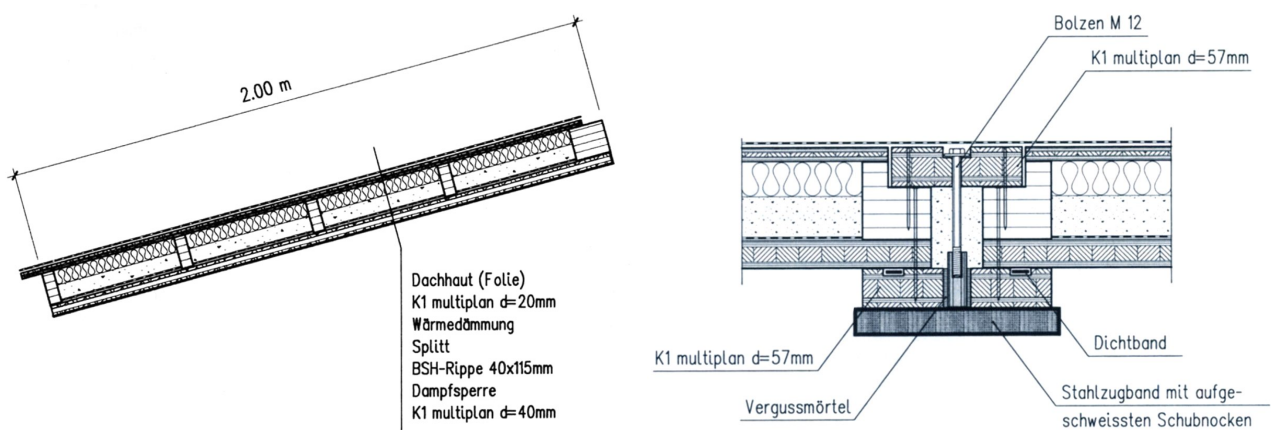


Bild 6-21 Einsatz von Fertigteilenelementen bei der Messehalle 26 Hannover (BNr. 10) [Bauen mit Holz 1997]
 links: Aufbau eines Hohlkastenelements aus Holzwerkstoffen (Längsschnitt)
 rechts: Anschluss der hölzernen Hohlkästen an die Stahlzugbänder (Querschnitt)

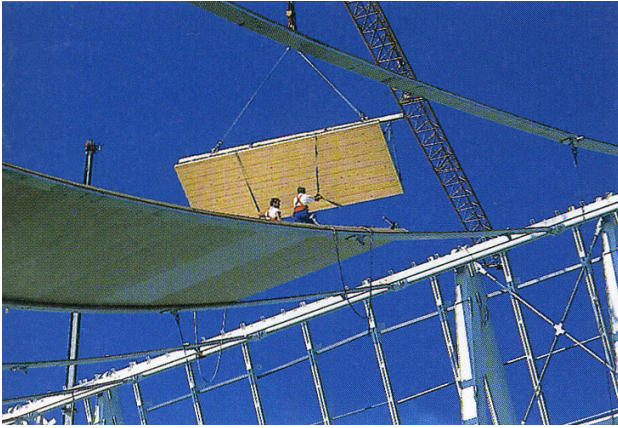


Bild 6-22 Verlegen der hölzernen Hohlkastenelemente auf den Stahlzugbändern (BNr. 10)[Herzog 1996-3]

Eine seltenere Bauweise mit hölzerner Dachhaut zeigt Bild 6-23. Die Dachbahnen bestehen aus massiven Brettschichtholzelementen, die am Boden auf Spannglieder aufgefädelt und anschließend angehoben werden.



Bild 6-23 Auffädeln der BSH-Elemente auf die Spannlitzen, Anheben und Vorspannen der Dachbahnen, c-Office Nagoya, Architekten: FT Architects, Ingenieure: Tada, Otsuka, Okada (BNr. 97) [Cellarius 2004]

Das Gewicht hölzerner Eindeckungen variiert je nach Aufbau oder Füllung der Elemente. Eine Schalentragwirkung kann durch Vorspannen der Dachhaut bei gleichzeitig schubsteifer Verbindung der Beplankung erzielt werden.

Beton

Betondächer gehören in der Regel zu den schwereren Ausführungen. Da der unbewehrte Beton nur eine sehr geringe Zugfestigkeit aufweist, wird die Betoneindeckung mit zusätzlicher Betonstahlbewehrung ausgeführt. Dacheindeckungen aus Beton bieten vielfältige Einbaumöglichkeiten. Bei einer Vorfertigung von Elementen können diese Fertigteile angeliefert und an den vorher montierten Seilen befestigt werden.

Bild 6-24 bis Bild 6-27 zeigen das Dach der Westfalahalle 4 in Dortmund. Als Zugelemente kommen bei diesem Hängedach Spannglieder zum Einsatz, die in Fertigteil-Rippen verlaufen und auf die Platten aus Bimsbeton verlegt wurden.

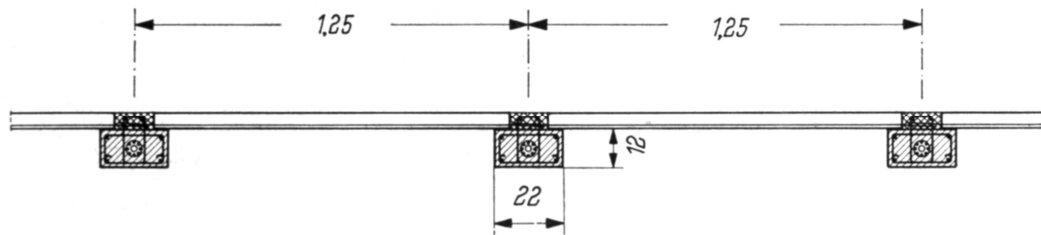


Bild 6-24 Querschnitt durch die Dachkonstruktion, Westfalahalle 4 Dortmund (BNr. 16) [Vaessen 1959]



Bild 6-25 Verlegen der Fertigteil-Rippen auf Gerüst und Schalung (BNr. 16) [Vaessen 1959]

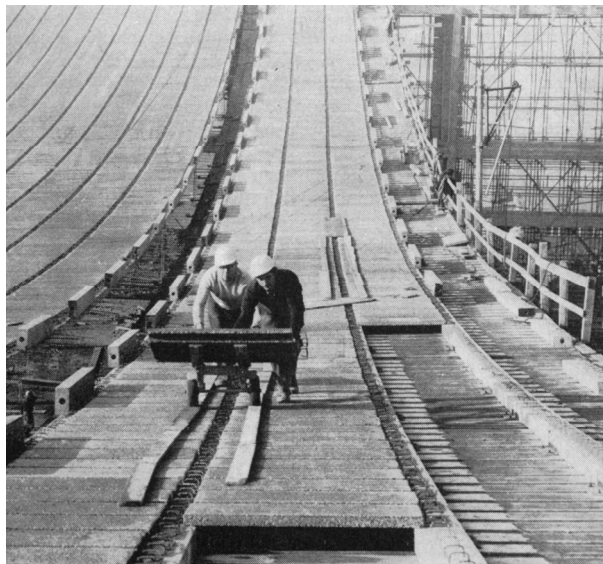


Bild 6-26 Verlegen der Bimsplatten auf den Rippen (BNr. 16) [Vaessen 1959]



Bild 6-27 Deckenuntersicht (BNr. 16)

Bei der Bauweise mit Halbfertigteilen werden diese zunächst platziert, anschließend mit einer Fugenbewehrung versehen und dann durch eine obere Ortbetonschicht ergänzt. Durch Vergießen der Fugen können die Elemente schubsteif miteinander verbunden werden. Bei zusätzlicher Vorspannung der Dachhaut kann die Steifigkeit der Schale noch erhöht werden.

Die Bauweise in Ortbeton erfordert üblicherweise zusätzliche Gerüste und Schalungen, die einen hohen Aufwand und deutliche Kostensteigerungen gegenüber Fertigteilösungen nach sich ziehen. Auf Bild 6-28 ist das Spannbetondach der Schwimmoper in Wuppertal im Bauzustand vor der Betonage zu sehen.

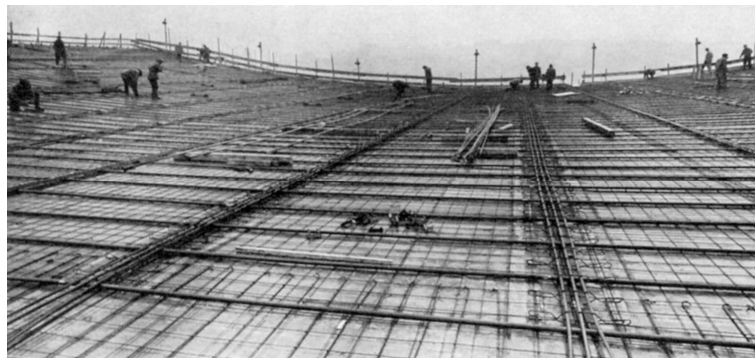


Bild 6-28 Einbau der Bewehrung und der Spannstähle auf Gerüst und Schalung, Schwimmoper Wuppertal, Architekt: Hetzelt, Ingenieur: Leonhard (BNr. 20) [Born 1964]

Eine Möglichkeit, auf ein Baugerüst zu verzichten besteht darin, dünne Betonbahnen am Boden liegend mit Anschlussseisen zu betonieren und nach dem Aushärten in die Endposition zu heben und zu befestigen. Dieses Verfahren wurde beim Neubau der Technischen Oberschule in Sofia genutzt (Bild 6-29 bis Bild 6-31).

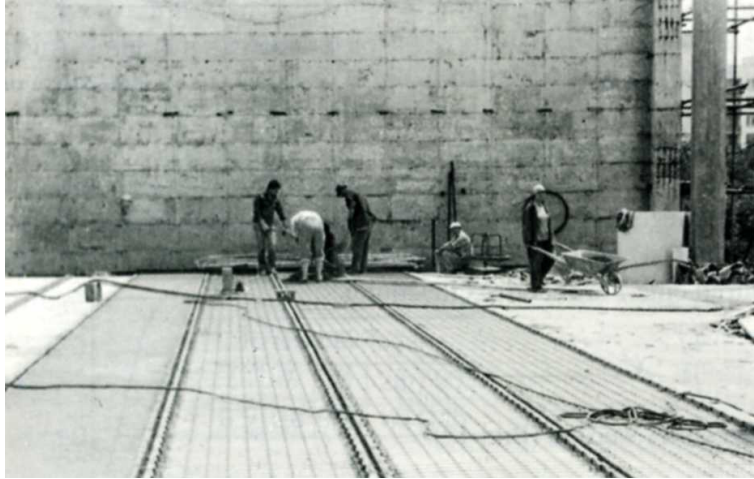


Bild 6-29 Betonieren der Dachbahnen ($h = 3,5\text{ cm}$) am Boden, Neubau der Technischen Oberschule für Energetik Sofia, Architekt: Todorova, Ingenieur: Kostov (BNr. 63) [Kostov 1985]

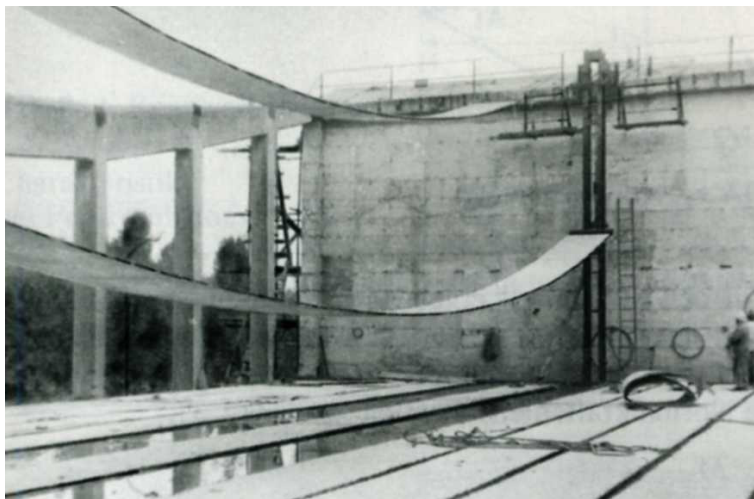


Bild 6-30 Anheben der Dachbahnen (BNr. 63) [Kostov 1985]



Bild 6-31 Eingehängte Bahnen (BNr. 63) [Kostov 1985]

Typische Bauteildicken von Stahlbetonschalen reichen von ca. 5 cm bis hin zu etwa 20 cm bei schweren Ausführungen. Die zusätzliche Vorspannung der Betondachhaut bietet viele Vorteile, da die für Beton charakteristischen Zugrisse reduziert, Bauteilfugen geschlossen und die Dachflächen stabilisiert werden.

Metall

Metall wird als Dachhaut aus Gewichts- und Kostengründen nur in Form von dünnen Blechen verwendet, die zur Erhöhung ihrer Steifigkeit gewellt, gekantet oder geknickt werden können. Dachflächen mit Metalleindeckung können in flächig tragende Blechdächer oder leichte profilierte Tafeln kombiniert mit Zugelementen unterschieden werden.

Bei Blechdächern bildet die Dachhaut gleichzeitig das Zugelement. Bild 6-32 zeigt das Blechdach der Getreidelagerhalle in Albany. Blechdachelemente können wie in diesem Fall im Werk vorgefertigt und erst im eingebauten Zustand miteinander verbunden werden, beispielsweise durch Verschweißen. Das Schweißen in großer Höhe ist jedoch schwierig und erfordert meist ein Arbeitsgerüst. Die Stabilisierung dünner Dachflächen kann gegebenenfalls durch Anordnung von Verstärkungen oder Beulsteifen erfolgen.

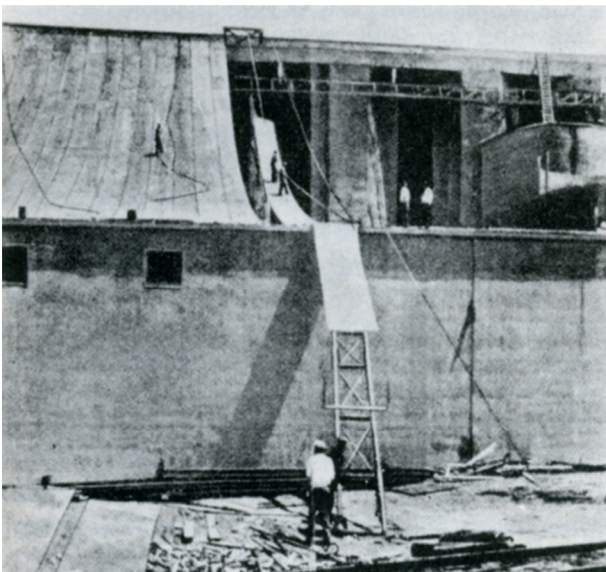


Bild 6-32 Einhängen eines vorbereiteten Blechstreifens (links) und Verschweißen der Dachbahnen (rechts), Getreidelagerhalle Albany, Architekt: James Stewart (BNr. 73) [Otto 1954]

Blechtafeln können als fertige, gegebenenfalls mit einer Wärmedämmschicht versehene Dach-elemente oder als profilierte Platten (Wellblech, Trapezblech) an den Tragseilen befestigt werden. Bild 6-33 zeigt verschiedene Möglichkeiten des Anschlusses der Dacheindeckung aus Profilblech an Zugseile.

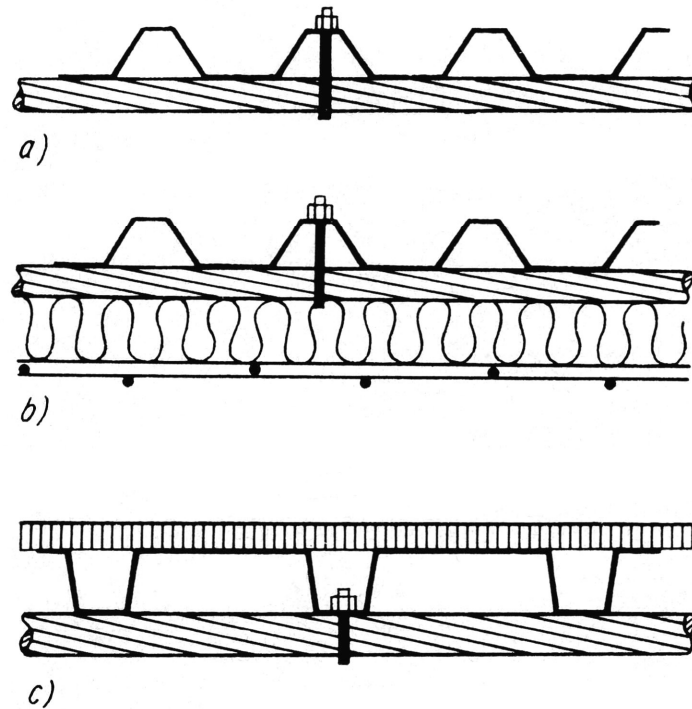


Bild 6-33 Anschluss der Profilblech-Eindeckung an Seilkonstruktionen [Rühle 1970]

- a) ohne Wärmedämmung
- b) mit unten liegender Dämmschicht
- c) mit oben liegender Dämmschicht

Glas

Vollflächige gläserne Eindeckungen werden zur Wahrung der Transparenz nicht durch einen weiteren Dachaufbau ergänzt. Die Wärmedämmeigenschaften dieser Dachflächen sind daher sehr begrenzt und ihre Anwendung in der Regel auf die Überdachung von freien Flächen beschränkt.

Die Glasscheiben können über Punkt- oder Linienhalterungen an den Zügelementen befestigt werden. Bild 6-14 auf Seite 141 zeigt die Glaseindeckung eines Bahnhofsvordachs in Ulm, die direkt auf den Flachstahl-Hängebändern aufliegt und mit Abdeckleisten gesichert ist.

Kunststoffe

Kunststoff-Dacheindeckungen sind beispielsweise als Well- oder Stegplatten erhältlich. Aufgrund ihrer geringen Tragfähigkeit und ihrer begrenzten Dauerhaftigkeit haben sich Acrylglas oder andere Kunststoffe als Eindeckungen für dauerhafte Hängedächer bisher nicht durchgesetzt.

6.2.4 Bauablauf

Da Hängedächer typischerweise sehr leicht und schlank ausgebildet werden, sind zu ihrer Errichtung auch nur geringe Massen und Volumen an den Bauort zu transportieren. Linienförmige Zügelemente können bereits im Werk mit End- und Anschlussstücken versehen und platz sparend im aufgerollten Zustand befördert werden. Vorgefertigte Eindeckungselemente ermöglichen aufgrund

ihres geringen Gewichts die Handhabung und den Transport ohne schweres Gerät, so dass diesbezügliche Kosten minimiert werden können.

Hängedächer zeichnen sich im Regelfall durch eine äußerst einfache Montage aus. Es besteht die Möglichkeit, sie in kürzester Zeit aus leichten Fertigelementen ohne Gerüst, Schalung, Abstützungen oder schweres Gerät zu errichten. In vielen Fällen sind schon Teilgerüste ausreichend (z. B. bei radialen Dächern zur Unterstützung des Innenrings). Erlaubt die Geometrie und Bauweise des Daches eine abschnittsweise Fertigung, so kann ein Teilgerüst nur einmal bereitgestellt und dann dem Baufortschritt folgend immer wieder umgesetzt und erneut verwendet werden.

Während der Montage ist das Dach ständigen Formänderungen unterworfen, da sich die Geometrie des Hängedachs entsprechend der Lagerung und Belastung einstellt. Eine horizontale Verschiebung des Auflagerpunkts erzeugt eine überproportionale Veränderung des Durchhangs. Weiterhin stellt jedes Auflegen eines Dachelements eine neue Belastung für das Hängeseil dar und bedingt somit eine Formänderung. Die Reihenfolge der Montage der Dachelemente muss daher im Planungsprozess festgelegt werden. Zur Reduzierung der Differenzverformungen ist es sinnvoll, mit dem Einhängen im Tiefpunkt zu beginnen und von dort aus gleichmäßig zu den Randträgern fortzuschreiten.

Weicht die Lage der Dachelemente von der Soll-Lage ab, kann es zu Problemen bei der Ausbildung des Dachgefälles, beim Vergießen der Fugen oder beim Anschluss der Fassaden kommen. Die Überwachung der Montage sollte daher bis zur Fertigstellung erfolgen und durch Kontrollmessungen der Dachgeometrie ergänzt werden. Gegebenenfalls muss auch die Reihenfolge der Montage der Längsseiten festgelegt werden, sofern sie die Geometrie und den Kräfteverlauf der Dachfläche beeinflusst.

Die Abdichtung der Fugen zwischen einzelnen Dacheindeckungselementen kann mit einem Verguss erfolgen. Da das Hängedach unterschiedliche Krümmungen aufweist und großen Verformungen ausgesetzt ist, müssen die Dachelemente, aber auch Licht- oder andere Dachöffnungen mit ihren Fugen flexibel ausgeführt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass sich schon beim Einbau die ideale Seillinie ohne Behinderungen einstellen kann. Erst nach der Einjustierung auf die exakte Lage sollten die Elemente schubfest verbunden werden.

Die Dachgeometrie, die sich infolge der endgültigen Ausbaulasten einstellt, kann durch eine Abspannung der Tragseile oder eine temporäre Zusatzlast auf der Dachfläche vorweg genommen und fixiert werden. Eine Verspannung behindert die Bewegung der Tragseile während der Montage bzw. der Betonage wirksam.

Die Vorspannung von Dachflächen kann durch Spanngeräte (Bild 6-34 und Bild 6-35) oder Spannschlösser, mittels Abspannung (Bild 6-36) oder Mehrbelastung (Bild 6-37) aufgebracht werden. Je nach statischen Erfordernissen ist die Einstellung der Vorspannung in verschiedenen Abstufungen, zu bestimmten Zeitpunkten (auch schon vor dem Anheben am Boden), in einer festen Reihenfolge und auf verschiedene Weise möglich. Wichtig sind hierbei jedoch die genaue Überwachung des Spannvorgangs und die Einhaltung der erforderlichen Spannwege.

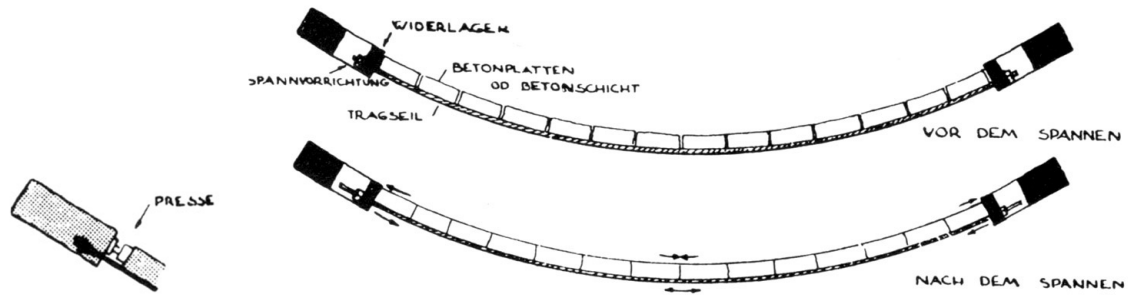


Bild 6-34 Vorspannen einer Hängedachfläche mit Spannpressen (links) [Otto 1954]



Bild 6-35 Vorspannen von Zuggliedern mittels hydraulischer Spannpressen gegen die Verankerungsränder [Rühle 1970]

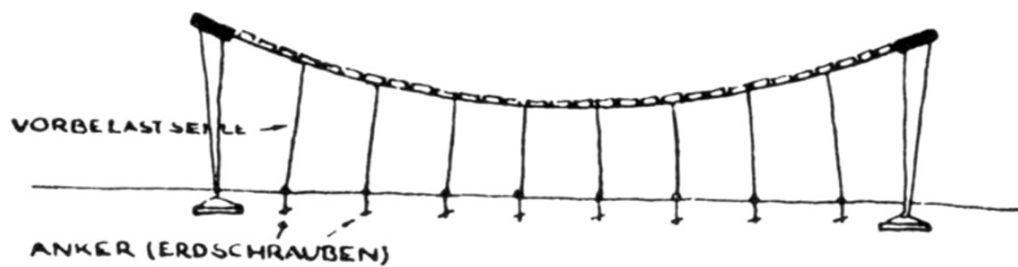


Bild 6-36 Vorspannen einer Dachfläche durch Abspannen [Otto 1954]



Bild 6-37 Vorwegnahme der Verformungen im Endzustand für Montage der Dacheindeckung, Neue Messe Stuttgart, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35) [Detail 2007] [Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig]

Beim Vorspannen mit Spannpressen gegen die Verankerungsränder (Bild 6-35) erfolgt der Fugenverguss der Stoßfugen zweckmäßig noch im schlaffen Zustand. Die Spannglieder sollten nach dem Anspannen in den Hüllrohren aus Gründen des Korrosionsschutzes mit Fett oder Zementsuspension verpresst werden. Beim Vorspannen mittels Mehrbelastung, die entweder auf die Dachfläche aufgelegt (Steine), an die Zugelemente gehängt (Sandsäcke) (Bild 6-37) oder mit provisorischen Fangseilen am Boden verankert wird (Bild 6-36), geschieht das Ausfüllen der Stöße nach dem Vordehnen des Zugelements und dem spannungslosen Einbau der Dachelemente. Die Vorspannung der Dachhaut wird durch die schrittweise Entlastung nach Aushärtung des Fugenmörtels erzeugt. Die Druckvorspannung sollte allgemein so groß gewählt werden, dass sie die infolge Schneelast (maximale Nutzlast) auftretenden Zugbeanspruchungen nach Schwinden und Kriechen sicher übersteigt und somit das Aufreißen des Dachquerschnittes verhindert.

6.3 Aussteifung und Stabilisierung

6.3.1 Einführung

Neben dem Eigengewicht wirken auf Hängedächer auch veränderliche Einwirkungen, wie Temperaturänderungen, Schnee- und Windlasten, bei denen sich neben der ungleichmäßigen Verteilung teilweise zusätzlich auch die Richtung umkehren kann (z.B. Windsog).

Bei dem einfach gekrümmten hängenden Dach können ungleichmäßig verteilte und insbesondere abhebende Einwirkungen zu unerwünscht großen Verformungen führen. Bild 6-38 verdeutlicht die Anfälligkeit leichter Hängedachflächen gegenüber Windsoglasten und Schwingungen.

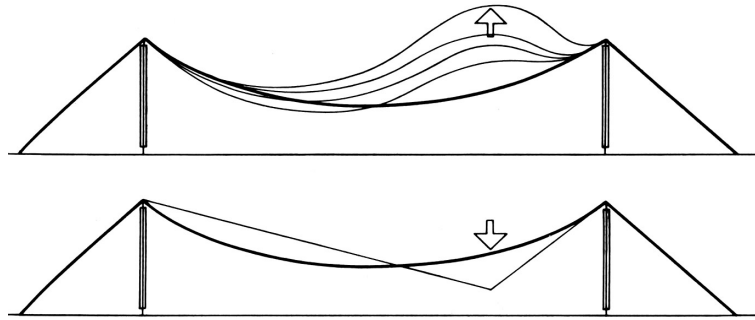


Bild 6-38 Verformungsanfälligkeit des Hängedachs bei abhebenden Einwirkungen und Schwingungen (oben) sowie veränderlichen Einzellasten (unten) [Engel 1967]

Wenn das Eigengewicht der Hängedachfläche lokal geringer ist als die entgegengesetzt wirkenden Windsogkräfte, besteht die Gefahr, dass die ursprünglich nach unten durchhängende Fläche unter wechselnden Windeinwirkungen schwingt, sich aufschaukelt oder sogar durchstülpt (siehe Bild 2-9 und Bild 2-10, S. 12).

Große Formänderungen oder Flattererscheinungen sind jedoch aus konstruktiven Gesichtspunkten sowie bei der Nutzung nachteilig und daher unerwünscht. Große Dachverformungen erschweren den Übergang zu anschließenden Bauteilen und bewirken hohe Beanspruchungen der Fugen in der Dachhaut. Schwingungen können zu Materialermüdung führen. Beide Effekte werden zudem von Nutzern als unangenehm empfunden. Daher müssen große Dachverformungen sowie ein unerwünschtes dynamisches Verhalten durch konstruktive Maßnahmen begrenzt werden.

Für die Stabilisierung von Hängedachflächen bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen können einzeln angewendet und auch miteinander kombiniert werden.

6.3.2 Stabilisierung durch Eigengewicht

Da Hängedächer aufgrund ihres charakteristisch geringen Eigengewichts anfällig für Verformungen aus ungleichmäßigen bzw. abhebenden Lasten sind, ist die Erhöhung des Eigengewichts eine naheliegende Möglichkeit der Stabilisierung der Dachflächenform (Bild 6-39).

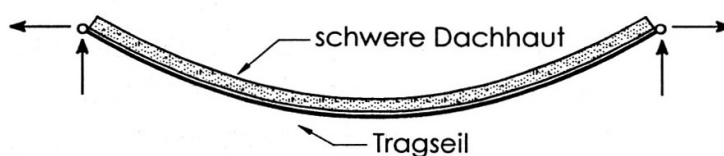


Bild 6-39 Ausbildung einer schweren Dachhaut [Leicher 2002]

Die Dachhaut sollte dabei so schwer hergestellt oder durch zusätzlich aufgebrachte Lasten beschwert werden, dass selbst unter den größten anzunehmenden Windsoglasten keine übermäßigen Verformungen auftreten. Diese so genannten „Schwergewichts-Hängedächer“ werden mit einer

Dachhaut ausgeführt, deren Flächenwichte in Abhängigkeit von den statischen und konstruktiven Randbedingungen festgelegt wird. Als Anhaltswert empfiehlt [Otto 1954], das Gewicht der Dachhaut nicht geringer als das 1,1- bis 1,3-fache der auf die Dachfläche angreifenden Windsogkräfte zu wählen. Gemäß [Roland 1965] sollten Hängedächer zur Stabilisierung mit einer Flächenwichte ausgeführt werden, die dem 1,2- bis 1,6-fachen der Windsogbelastung entspricht.

Bild 6-40 zeigt exemplarisch den Portugiesischen Pavillon auf dem Gelände der Weltausstellung von 1998 in Lissabon. Das Stahlbetondach spannt frei über annähernd 70 m. Es besitzt eine Bauteildicke von 20 cm, die einer Flächenwichte von 5 kN/m^2 entspricht (vergleiche auch Tabelle 5-1, S. 99).

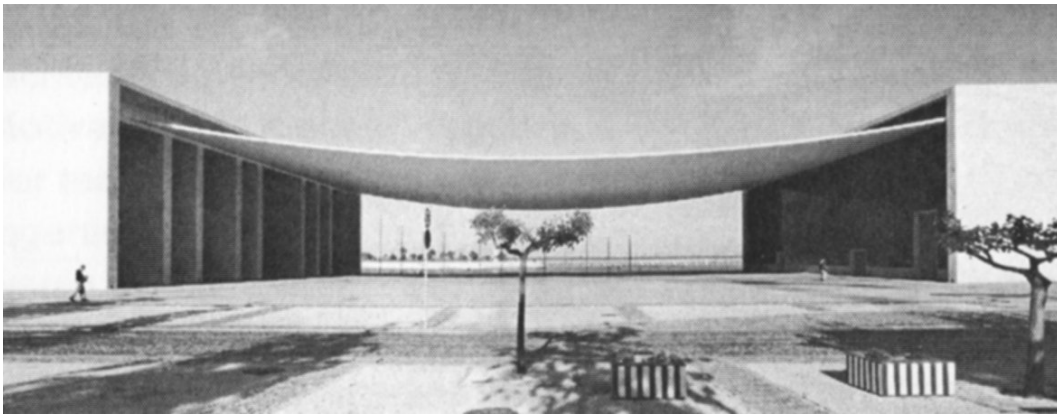


Bild 6-40 Portugiesischer Pavillon mit Schwergewichtshängedach, Architekt: Siza Vieira, Ingenieur: Arup (BNr. 55) [Flury 2010]

Auch gewichtsstabilisierte Hängedächer verformen sich bei ungleichmäßigen Lasten. Je größer jedoch das Verhältnis von gleichmäßig verteilten Eigenlasten zu ungleichmäßigen Einwirkungen ausfällt, desto geringere Differenzverformungen stellen sich ein (siehe Bild 6-41).

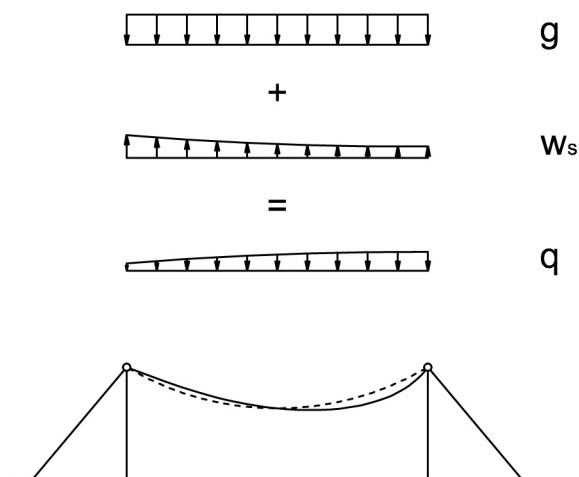


Bild 6-41 Überlagerung von großem Eigengewicht und Windsog mit Darstellung des verformten Systems

Die Eigenfrequenzen von Hängedächern sind bei üblichen Ausbildungen unabhängig vom Gewicht der Konstruktion und von der Biegesteifigkeit der Dachhaut. Die Dämpfung ist dagegen material- und strukturabhängig. Um widerregte Schwingungen weitgehend einzudämmen, werden vorzugsweise nicht nur schwere Materialien mit hoher Steifigkeit wie z. B. vorgespannter Stahlbeton, sondern auch solche mit einer hohen Materialdämpfung verwendet (z. B. Holz). Zur Schwingungsdämpfung können gegebenenfalls weitergehende Maßnahmen wie der Einbau von Dämpferelementen ergriffen werden.

Bei der Ausführung einer schweren Dachhaut verteilen sich die zusätzlich aufgebrachten Massen gleichmäßig über die gesamte Dachfläche. Das Hängedach bildet in diesem Fall die typische Kettenlinienform aus. Eine ähnliche Art der Stabilisierung, bei der jedoch eine abweichende Hängeform auftritt, besteht in der Anordnung von Stabilisierungsgewichten (Bild 6-42). Bei radialen Hängedachsystemen bietet sich eine schwere Ausführung des inneren Zugrings bzw. eine zentral angeordnete Zusatzmasse an. Die Seile werden durch diesen Ballast vorgespannt und damit stabilisiert. Die entstehende Dachflächenform entspricht im Grenzfall einem umgedrehten Kegelstumpf, bei dem die Zuelemente durch die hohe Vorspannung annähernd linear verlaufen. Auch bei anderen Grundrissgeometrien ist eine Gewichtsstabilisierung durch Einzelmassen denkbar, würde jedoch gravierende Auswirkungen auf die Dachform bedeuten.

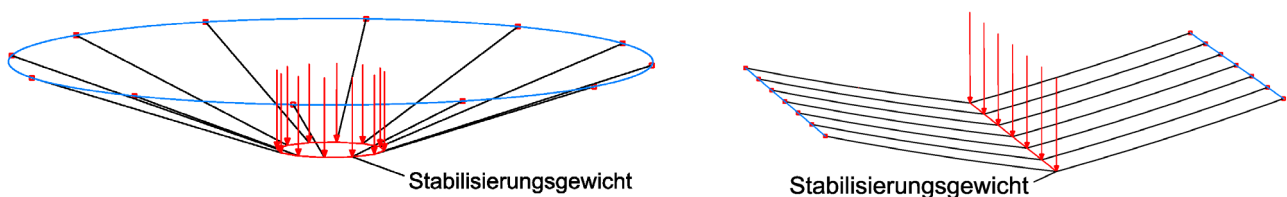


Bild 6-42 Ausführung von Dachflächen mit Stabilisierungsgewichten

Radiale Systeme mit zentraler Stabilisierungsgewicht finden sich bei den Hängedächern der Rundhalle in Gleisdorf (Bild 8-15, S. 188), dem Französischen Pavillon in Zagreb (Bild 8-6, S. 184) oder der Rudi-Sedlmayer-Halle in München (Bild 6-43).

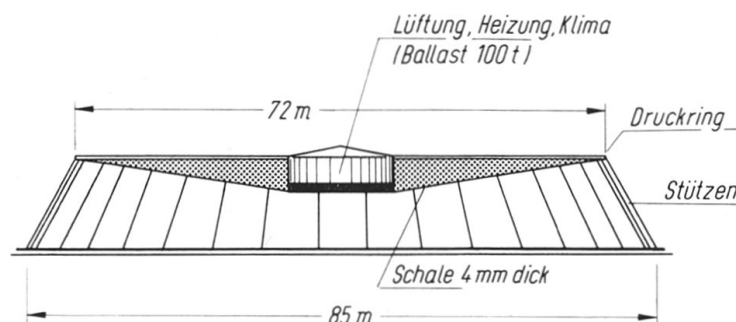


Bild 6-43 Rudi-Sedlmayer-Halle mit mittigem Stabilisierungsgewicht von 100 t, Architekt: Georg Flinkerbusch (BNr. 38) [Schröter 1972]

Die Ausbildung einer schweren Dachhaut ist eine konstruktiv einfache Methode zur Stabilisierung einer frei hängenden Dachfläche. Der Nachteil der Stabilisierung durch Gewicht liegt in der Erhö-

hung der abzutragenden Vertikallasten, die zu einer Verstärkung aller am weiteren Lastabtrag beteiligten Konstruktionen und daher zu erhöhten Baukosten führt. Außerdem geht der Hauptvorteil der Hängedächer – ihre besondere Leichtigkeit – verloren. Die Eigengewichtserhöhung sollte daher stets genau untersucht und optimiert werden.

Bei sehr großen Spannweiten wird die auftretende Windsogbelastung häufig bereits durch das konstruktiv erforderliche Eigengewicht der Haupttragelemente überschritten, so dass keine zusätzliche Beschwerung erforderlich ist.

6.3.3 Stabilisierung durch Erzielung einer Schalentragwirkung mittels Vorspannung

Eine weitere Möglichkeit, Hängedächer zu stabilisieren, besteht darin, sie in Tragrichtung vorzuspannen und so eine Schalentragwirkung zu schaffen. Eine vorgespannte Konstruktion zeichnet sich dadurch aus, dass sie im unbelasteten Zustand Druckspannungen aufweist (siehe Kapitel 5.2.4). Neben Spannbetonschalen eignen sich auch Fertigteilelemente, die, z. B. auf Spannstählen aufgefädelt, mit einer Vorspannung versehen werden können.

Durch die Vorspannung werden die Schub- und Biegesteifigkeit der Dachhaut wesentlich erhöht. Aus dem Seiltragwerk entsteht so eine vorgespannte, steife Zylinderschale, die als „Hängeschale“ bezeichnet wird (Bild 6-44). Die Lastabtragung erfolgt über die vorgespannte Hängeschale bei geringen Biegebeanspruchungen. Die Steifigkeit der Schale lässt sich noch erhöhen, wenn die Ränder zusätzlich verstärkt werden, z. B. durch Aufwulsten. Die Verformungen – auch unter aufwärts gerichteter oder ungleichmäßiger Last – können so deutlich reduziert werden.

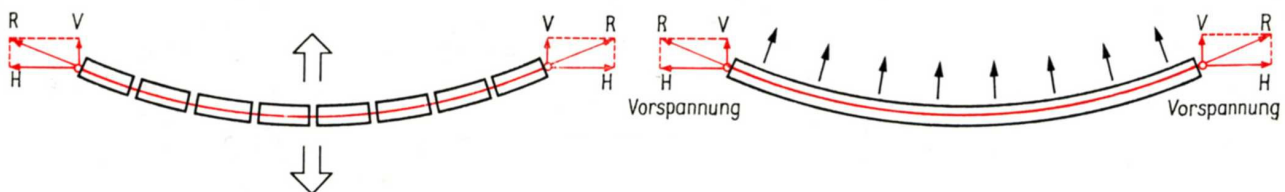


Bild 6-44 Stabilisierung der Tragseile [Büttner 1985]

links: durch Auflast ohne Vorspannung (Seiltragwirkung)

rechts: durch Auflast und Vorspannung (Schalentragwirkung)

Durch die Vorspannung entsteht eine steifere Dachkonstruktion, so dass zur Vermeidung übermäßiger Verformungen nur ein im Vergleich zum nicht vorgespannten Schwergewichts-Hängedach geringeres Eigengewicht erforderlich ist.

Beim Dach der Sporthalle in Augsburg (Bild 6-45) wurden die nur 38 mm dicken Stahlbeton-Fertigteilplatten nach dem Einhängen in die Spannseile und dem Fugenverguss vorgespannt, so dass die Verformungen des Daches erheblich reduziert werden konnten.

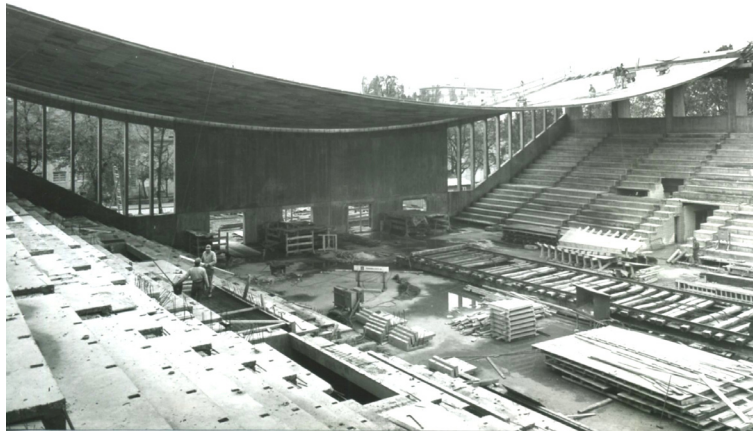


Bild 6-45 Sporthalle Augsburg, Ansicht des teilweise montierten Dachs, Architekt: Hugo Gall (BNr. 37) [Bild-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig]

Die Vorspannung der Dachfläche führt zu einer Tragwirkung, die von der eines Hängedachs abweicht. Statt des ausschließlichen Lastabtrags entlang der Haupttragelemente über Zugkräfte wird infolge der Schalentragwirkung auch eine Querverteilung der Lasten erreicht und Einwirkungen zusätzlich über Biegebeanspruchungen abgetragen. Die charakteristische Form des Hängedachs bleibt bei dieser Methode erhalten.

6.3.4 Stabilisierung mit Hilfe von Abspannseilen

Unerwünschte Verformungen, Schwingungen oder ein Durchstülpen der Dachfläche können durch eine Fixierung mit Abspannseilen unterbunden werden. Die Abspannseile, auch Windseile genannt, sind Seile oder Drähte, die die Dachhaut nach unten gegen feste Bauwerksteile verspannen. Sie werden an besonders verformungsgefährdeten Stellen des Daches angeordnet, wie z. B. an den freien Längsrändern oder in Dachbereichen mit geringer Krümmung.

Bild 6-46 zeigt die Anordnung von Abspannseilen zur Stabilisierung der schwächer gekrümmten Dachregionen entlang der Auflagerlinien am Beispiel der Raleigh-Arena in North Carolina (1953).

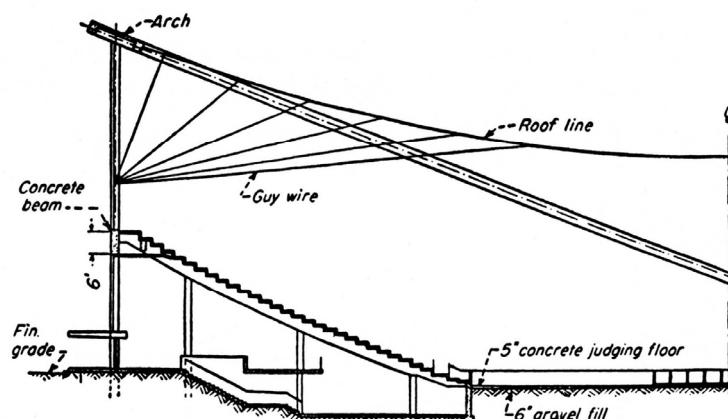


Bild 6-46 Stabilisierung der Dachhaut mit Abspannseilen („guy wire“) in schwach gekrümmten Bereichen, halber Längsschnitt, Raleigh-Arena, Architekten: Nowicki, Deitrick, Ingenieure: Severud, Elstad und Krueger (BNr. 79) [Otto 1954]

Bei Nutzung von Abspannseilen entlang der freien Längsränder können diese vertikal verlaufen und in Fundamenten verankert werden. Die durch die Abspannseile eingetragenen Kräfte können in Abhängigkeit von der Größe der gewählten Vorspannung zu einem polygonalen Verlauf der Randseile führen (Bild 6-47). Die Abspannelemente können gestalterisch in die Längsfassade eingebunden werden.

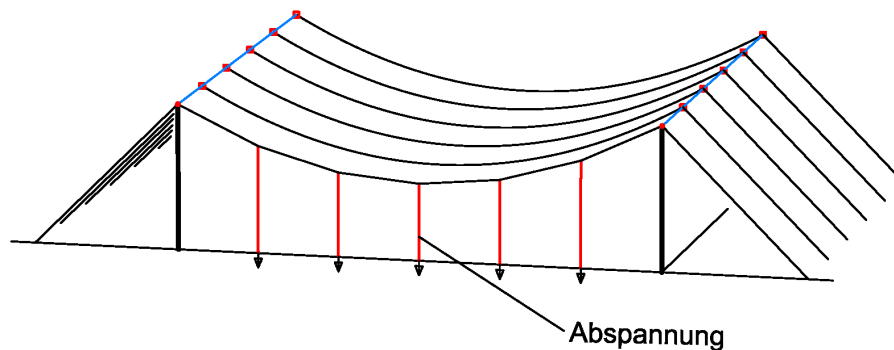


Bild 6-47 Vertikale Längsseitenabspannung

Bei Ausbildung der Dachfläche als Seil-Trägernetz (vergleiche Kapitel 2.1.1) ist die Abspannung der auf der Dachfläche aufliegenden Querträger an ihren Enden nach unten besonders wirkungsvoll (siehe Bild 6-48). Zur Reduzierung von Schwingungserscheinungen können die Abspannseile zusätzlich mit Dämpfungselementen ausgestattet werden.

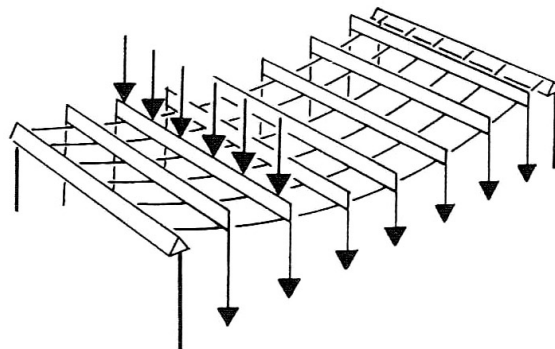


Bild 6-48 Seil-Trägernetz mit Abspannung der Querträger an ihren Enden [Siegel 1960]

Die Abspannseile werden in der Regel vorgespannt. Hierdurch wird erreicht, dass bereits geringe Dachverformungen wirksam behindert werden. Die Vorspannkkräfte sollten dabei so eingestellt werden, dass die natürliche Hängeform des Daches erhalten bleibt. Mit der Anordnung von Abspannseilen besteht auch die Möglichkeit, labile Hängedächer nachträglich zu ertüchtigen.

Bei der Kirche Heilig-Geist in Essen-Katernberg (Bild 6-49) erfolgt die Abspannung der freien Längsseiten über Stahlprofile, die vor der Glasfassade im Abstand von 2 m angeordnet sind und die Sogkräfte durch den angreifenden Wind aufnehmen.



Bild 6-49 Kirche Heilig-Geist mit Abspannungen an den verglasten Längsseiten, Architekt: Gottfried Böhm (BNr. 18) [Voigt 2006]

Zur Stabilisierung des Hängedachs über dem Werkhof der Stadtwerke in Hohenems wurden mehrere Maßnahmen kombiniert. Neben der Abspannung der freien Längsseiten durch vorgespannte Stahlstangen (Bild 6-50) wurden die hölzernen Dachelemente zur Erhöhung ihres Eigengewichts mit einer Splittfüllung versehen, so dass sich eine erhöhte Flächenwichte von $1,0 \text{ kN/m}^2$ ergibt. Zusätzlich erfolgte nach der Montage eine schubfeste Verbindung der einzelnen Elemente durch Nägel, um die Steifigkeit der Dachfläche zu erhöhen und so die Verformungen aus ungleichmäßigen Lasten klein zu halten.



Bild 6-50 Abspannung der freien Ränder, Werkhof der Stadtwerke Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Detail 2001]

Auch beim Hängedach der Messehalle 26 in Hannover wurden mehrere Stabilisierungsmaßnahmen angewendet. Durch das Verspannen der Fassadenprofile zwischen den Fundamentbalken und den äußeren Zugbändern bleibt der freie Dachrand nahezu unbeweglich. Zusätzliche Abspannseile sollen Formänderungen der Dachfläche infolge ungleichmäßiger Schneelasten begrenzen. Zur Vermeidung dynamischer Effekte sind diese Seile darüber hinaus mit Federelementen ausgerüstet (Bild 6-51). Das durch eine Kiesfüllung bedingte, relativ hohe Eigengewicht der Dachpaneele von $1,20 \text{ kN/m}^2$ soll Schwingungen unter Windlast verhindern und Verformungen unter unregelmäßiger Vertikallast (Schnee einseitig) begrenzen. Darüber hinaus sind die Paneele untereinander über eine Vernagelung verbunden, um eine ausreichende Schubsteifigkeit für die Lastverteilung und eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens zu erreichen.



Bild 6-51 Vorgespannte Fassadenpfosten und Abspannung des Dachs gegen die Auflagerböcke, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

Die Stabilisierung von Hängedächern durch die Anordnung von Abspannseilen ist eine wirkungsvolle, wirtschaftliche und optisch unauffällige Methode, die die Charakteristik von Hängedächern weitestgehend bewahrt.

6.3.5 Stabilisierung durch Gegenspannseile

Das Prinzip der Stabilisierung durch Gegenspannseile ist bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Bei dieser Methode wird das die Dacheigenlasten abtragende Seil stabilisiert, indem es mit einem zweiten darunter liegenden Seil verspannt wird. Trag- und Spannseil sind zueinander gegenläufig gekrümmt und durch Zwischenseile oder Stäbe miteinander verbunden.

Durch Anspannen des unten liegenden Gegenseils wird der betreffende Bereich der Dachfläche vorgespannt und stabilisiert. Bei abhebenden Belastungen (Windsog) vertauschen Trag- und Gegenspannseil ihre Funktionen (Bild 6-52). Die Dacheindeckung kann dabei sehr leicht ausgeführt werden, da sie nicht zur Stabilisierung herangezogen werden muss. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die einzelnen Abspannseile unterschiedlich vorzuspannen, so dass deren Eigenfrequenzen variieren und auftretende Schwingungen gegenseitig gedämpft werden.

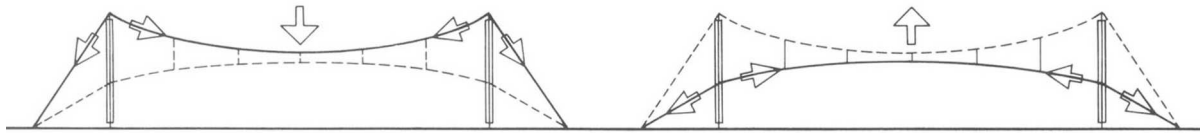


Bild 6-52 Tragverhalten eines gegengespannten Zuelements [Engel 1967]

links: bei nach unten gerichteter Belastung (Eigengewicht, Schnee)

rechts: bei nach oben gerichteter Belastung (Windsog)

Die Gegenspannseile können an jedem Zuelement angeordnet werden. Sinnvoll ist jedoch insbesondere die Verstärkung einzelner, stark beanspruchter Teilbereiche, wie beispielsweise eine Verspannung der freien Längsränder (Bild 6-53).

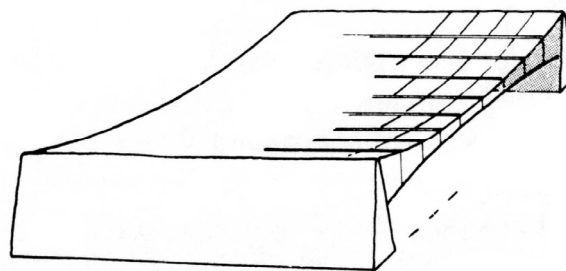


Bild 6-53 Stabilisierung der freien Längsseiten eines Hängedachs mit Gegenspannseilen [Otto 1954]

Bei den Hängedächern der Hallen der Neuen Messe Stuttgart sind zur Sicherung gegen Windsogbelastung nur die Tragseile im Bereich der Stützenböcke mit Stahlseilen unterspannt (Bild 6-54).



Bild 6-54 Unterspannung der Tragseile im Bereich der Auflagerböcke, Neue Messe Stuttgart, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35) [Wettbewerb 2007]

Die Methode der Stabilisierung mit Hilfe von Gegenspannseilen erfordert einen zusätzlichen konstruktiven Aufwand, ermöglicht jedoch eine einheitliche und leichte Ausführung der gesamten Dachfläche. Um auch die Kräfte aus den Gegenspannseilen abzuleiten, sind ergänzende bauliche Maßnahmen erforderlich.

7 Anschlüsse von Zugelementen

7.1 Grundlagen

Zur Ausbildung der Haupttragelemente von Hängedächern können unterschiedliche Baustoffe und -formen genutzt werden (siehe Kapitel 6.2.2). Die hoch beanspruchten Anschlüsse müssen dabei die auftretenden Zugkräfte für die geplante Nutzungsdauer sicher in die Verankerungskonstruktion übertragen. Dem Tragverhalten des Hängedachs entsprechend sollten die Anschlüsse gelenkig, schlupffrei und gegebenenfalls mit der Möglichkeit zur Nachjustierung ausgeführt werden. Die Anschlussdetails müssen daher in Abhängigkeit von der Art und Ausbildung der Zugelemente, der Verankerungskonstruktionen und den Einbaubedingungen geplant werden.

Verbindungen können unterschieden werden in lösbare und in dauerhaft feste Anschlüsse. Zu den lösbaren gehören in der Regel Verbindungen mit Schrauben, Bolzen und Stabdübeln, Keilen sowie Klemm- und Steckverbindungen. Nicht ohne Zerstörung lösbar sind Verbindungen, die verschweißt, verklebt, vergossen, einbetoniert oder auch vernietet sind. Feste Verbindungen werden meist in der Werkstatt hergestellt, während lösbare Verbindungen in der Werkstatt vorgefertigt, aber auf der Baustelle montiert und nachjustiert werden können.

Des Weiteren lassen sich Verbindungen in die Kategorien Formschluss, Stoffschluss und Kraftschluss einteilen. Für die unterschiedlichen Materialien der zu verbindenden Komponenten zeigt Tabelle 7-1 eine Übersicht über mögliche Verbindungsarten.

Tabelle 7-1 Übersicht über Verbindungsarten

Material	Formschluss	Stoffschluss	Kraftschluss
Metall	Scher-Lochleibungsverbindungen mit Schrauben, Bolzen, Nägeln, Nieten Steckverbindungen	Verschweißung Verguss Einbetonierung	Verkeilung Verpressung
Holz / Holzwerkstoff	Scher-Lochleibungsverbindungen mit Schrauben, Bolzen, Stabdübeln, Nägeln zimmermannsmäßige Verbindungen	Verleimung	(Verkeilung)
Faserverstärkter Kunststoff		Verklebung	Verkeilung Verpressung

Nachfolgend werden typische Anschlüsse von Hängedach-Zugelementen zusammengestellt und wesentliche Details zur Planung und Ausführung erläutert.

7.2 Seilanschlüsse

Zugtragelemente von Hängedächern werden häufig als Stahlseil ausgeführt. Darüber hinaus können Stahlseile zur Ab- und Unterspannung der Dachfläche sowie in Konstruktionen zur Lastweiterleitung eingesetzt werden. Stahlseilverbindungen dienen dabei der Übertragung der Zugkräfte aus dem Seil in die Verankerungskonstruktion. Die Tragfähigkeit der Verbindungen sollte grundsätzlich mindestens der Tragfähigkeit der Seile entsprechen. Wichtig ist zudem, dass die Kraftübertragung schlupffrei und die Herstellung des Anschlusses sicher und gegebenenfalls auch auf der Baustelle möglich ist. Bild 7-1 zeigt eine Übersicht verschiedener Möglichkeiten, Seil-Endverbindungen für offene und vollverschlossene Spiralseile auszuführen. Unterschieden werden hierbei reib- und stoffschlüssige sowie reib- und formschlüssige Verbindungen.



Bild 7-1 Seil-Endverbindungen für offene und vollverschlossene Spiralseile [Westerhoff 1992]

Eine Art der Seilendverbindung, die sowohl für offene wie vollverschlossene Spiralseile als auch für Rundlitzenseile geeignet ist, ist der Verguss. Hierbei werden die Seilenden in den konischen Seilköpfen (Seilhülsen) entweder durch einen Metallverguss (z. B. mit Zink) oder einen Kunststoffverguss (Epoxid- oder Polyesterharz) gemäß DIN EN 13411-4 verankert. Für Paralleldrahtbündel wird ein Kugel-Epoxidharz-Verguss verwendet. Dieser besteht aus harten Stahlkugeln als Traggerüst, dem Epoxidharz als Bindemittel und Füllern wie beispielsweise Zinkstaub. Die Kraftübertragung vom Seil über den Verguss in den Seilkopf erfolgt symmetrisch. Die Bruchkraft des Seiles wird durch das Vergießen in der Regel nicht gemindert, die Qualität der Verbindung muss jedoch durch Prüfungen nachgewiesen werden.

Bild 7-2 zeigt Aufnahmen von der Montage des Hängedachs der Madison Square Garden Arena in New York. Die als Zugelement eingesetzten Brückenseile mit 95,5 mm Durchmesser werden am inneren Zugring mittels geschmiedeter Gabelendstücke gelenkig angeschlossen.



Bild 7-2 Madison Square Garden Arena, Architekt: Charles Luckman, Ingenieure: Severud, Perrone, Fischer, Sturm, Conlin, Bandel (BNr. 75) [Schneider 1968]

links: fertiges Stahlseil mit geschmiedetem Gabelendstück

rechts: innerer Zugring mit Augenblechen

Eine andere Methode, bei der ebenfalls nur geringe Tragfähigkeitsverluste auftreten, ist die Verbindung mit Stahlpressendstücken, die bei Seildurchmessern bis 60 mm angewendet werden kann (Bild 7-3 A-E und G). Das Seilende wird in eine Bohrung des Endstückes eingeschoben und dieser Bereich im Anschluss kalt verformt. Geeignet ist dieses Verfahren für offene Spiralseile und Rundlitzenseile, die Kraftübertragung erfolgt symmetrisch.

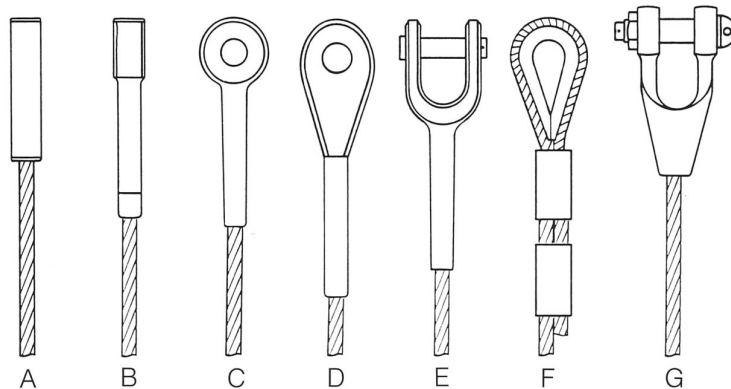


Bild 7-3 Verbindungen mit Pressklemmen [Westerhoff 1992]

A, B zylindrische Form ohne und mit Gewinde

C, D Augenendstücke (Vollkauschen)

E, G Gabelendstücke

F Augenendstück mit Aluminium-Pressklemmen, exzentrischer Anschluss des Seils

Bei Verwendung von Aluminium-Pressklemmen liegen die Schlaufenmitte und die Seilachse asymmetrisch (Bild 7-3 F). Die Anwendung ist eingeschränkt auf dünnadrätige offene Spiralseile mit einem Seildurchmesser bis etwa 30 mm und Rundlitzenseile. Die Ausführung erfolgt mit einer

Aluminium-Knetlegierung. Dabei sind Bruchkraftverluste von bis zu 15% zu berücksichtigen. Es gilt DIN EN 13411-3.

Für Seile bis 40 mm Durchmesser sind auch verschraubte Endverbindungen möglich. Dabei wird das Seilende z. B. um eine Kausche gelegt und mit Drahtseilklemmen nach DIN EN 13411-5 befestigt (Bild 7-4). Hierbei muss beachtet werden, dass sich Seile im belasteten Zustand längen, ihr Durchmesser abnimmt und die Seilklemmen damit an Vorspannkraft verlieren. Daher müssen die Klemmen nach Aufbringung der planmäßigen Seilkraft nochmals nachgespannt werden. Die Kraftübertragung erfolgt asymmetrisch mit einem Bruchkraftverlust bis zu 20%. Zur Anzahl der erforderlichen Klemmen sowie der Größe des Anziehmoments sind die Angaben der DIN 18800 Teil 1 zu beachten.

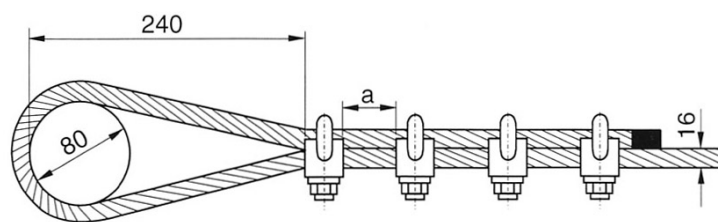


Bild 7-4 Beispiel für eine Seil-Endverbindung mit Drahtseilklemmen [Peil 2000]

Zur Übertragung von Seilkräften gibt es darüber hinaus noch weitere Methoden, wie z. B. Spleiß- oder Klemmverbindungen.

Beim Hängedach des c-Office in Nagoya (Bild 6-23, S. 147) erfolgt eine Verspannung der BSH-Dachelemente über Stahlseile $\varnothing 21,8$ mm. Bild 7-5 zeigt das Anschlussdetail des hohen Dachpunkts. Die Verankerung der Seilkräfte erfolgt dabei über Klemmverbindungen mit Keilen.

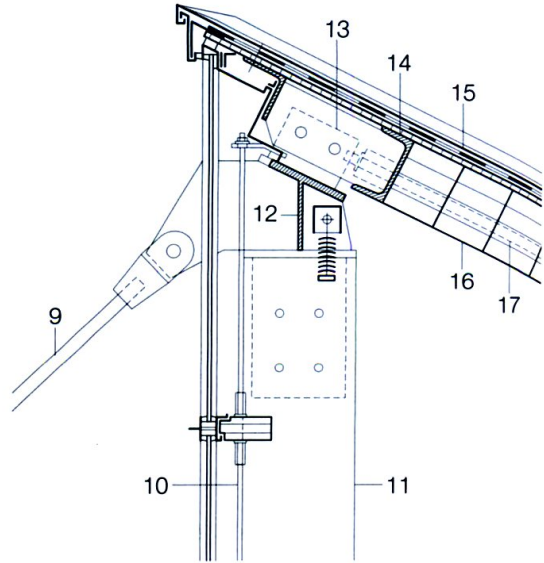
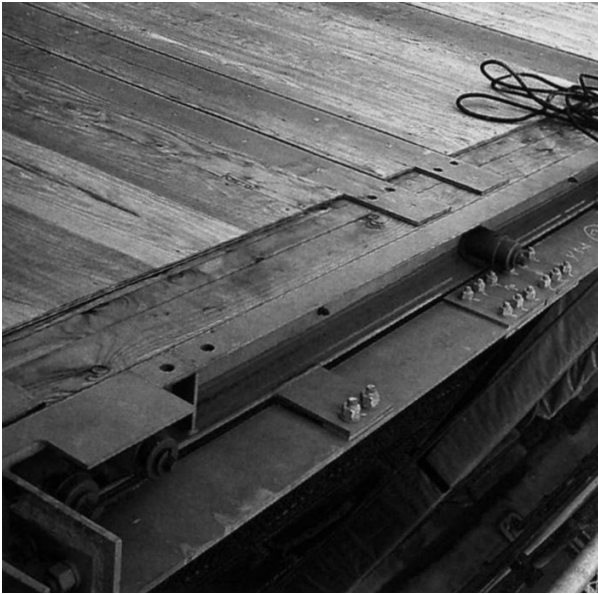


Bild 7-5 c-Office Nagoya, Architekten: FT Architects, Ingenieure: Tada, Otsuka, Okada (BNr. 97) [Cellarius 2004]

links: Verspannung der BSH-Elemente gegen ein Stahlprofil

rechts: Anschlussdetail Zuelemente-Stützen-Abspannung:

9 Abspannung Rundstahl \varnothing 28 mm

10 Abhängung Fassadenriegel Rundstahl \varnothing 10 mm

11 Stütze BSH 240/120 mm

12 Auflager Hängedach Stahlträger geschweißt aus Flachstahl 12 mm und 9 mm

13 Flansch Stahlblech 19 mm mit Bolzen 2 M 20

14 Randträger Stahlprofil U 150/75 mm

15 Dachhaut aus Stahlblech, Bitumenpappe, Sperrholz einschl. Flachstahlband 150/9 mm

16 BSH-Dachelement 16,50/3,00 m: Amerikanische Kiefer BSH 150/120 mm

17 Stahlseil \varnothing 21,8 mm

Mit Hilfe von Spannschlössern (siehe Bild 7-6) können auch nach dem Einbau noch Längenänderungen bzw. Vorspannungen vorgenommen werden. Bild 7-7 und Bild 7-8 zeigen gebaute Beispiele.

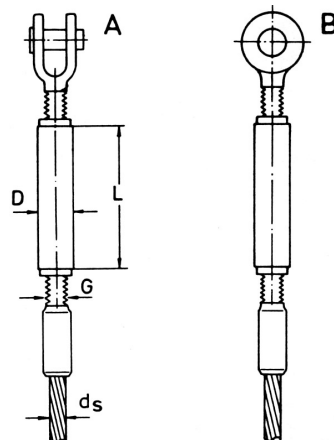


Bild 7-6 links: Spannschloss zur Justierung der Seillänge
rechts: Gabelspannschloss [Knippers 2010]



Bild 7-7 Anschluss der Gegenspannseile am Auflagerbock mit Gabelspannchlössern, Neue Messe Stuttgart, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35)

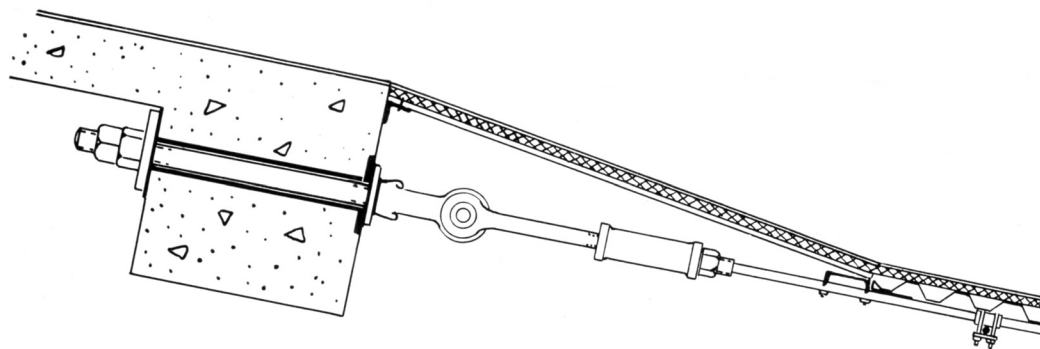


Bild 7-8 Anschluss des Tragseils an den Betonrand über Gewindemuffe, Spannschloss und Augenstab, Raleigh-Arena, Architekten: Nowicki, Deitrick, Ingenieure: Severud, Elstad und Krueger (BNr. 79) [Otto 1953-1]

Zur Verbindung von zwei oder mehreren Seilenden ist der Einsatz von Verbindungslaschen oder Nierenblechen möglich (Bild 7-9).

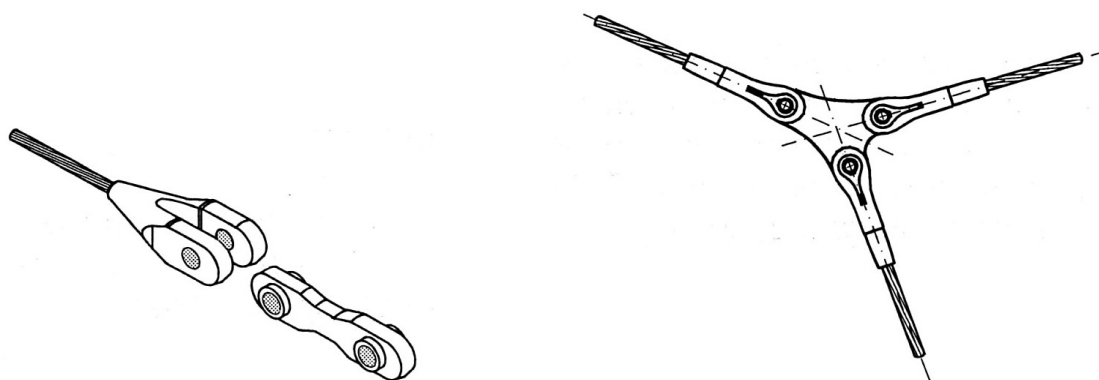


Bild 7-9 Verbindung von Seilenden mit Verbindungslasche (links) und Nierenplatte (rechts) [Leicher 2002]

In Abhängigkeit von der Seilart, der Größe der zu übertragenden Kräfte, den Einbau- und Umgebungsbedingungen bzw. der Konstruktion, an die das Seil angeschlossen werden soll, sind verschiedene Ausführungen der Verbindungen möglich.

Bei allen Anschlüssen und Knotenausbildungen sollte aufgrund der typischerweise hohen Beanspruchung besondere Aufmerksamkeit auf dem Entwurf, der fehlerfreien Ausbildung und der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz) liegen.

7.3 Spanngliedverankerungen in Beton

Bei Hängedächern in Spannbetonbauweise bilden Spannglieder die Zuelemente. Die Endverankerung der Spannglieder in den Beton-Randträgern kann mit verschiedenen Systemen erfolgen. Hierzu sind von Spezialfirmen unterschiedliche Verankerungskörper entwickelt worden. Zur Verankerung der Spannglieder in den Randträgern des Hängedachs muss deren Ausbildung gegebenenfalls den Erfordernissen der Verankerungskörper angepasst werden.

Grundsätzlich kann zwischen beweglichen und festen Ankern unterschieden werden. Unter beweglichen Ankern werden Spannanker verstanden, an denen die Spannprese angesetzt wird. Verschiedene Ausführungen von Spannankern sind in Bild 7-10 dargestellt.

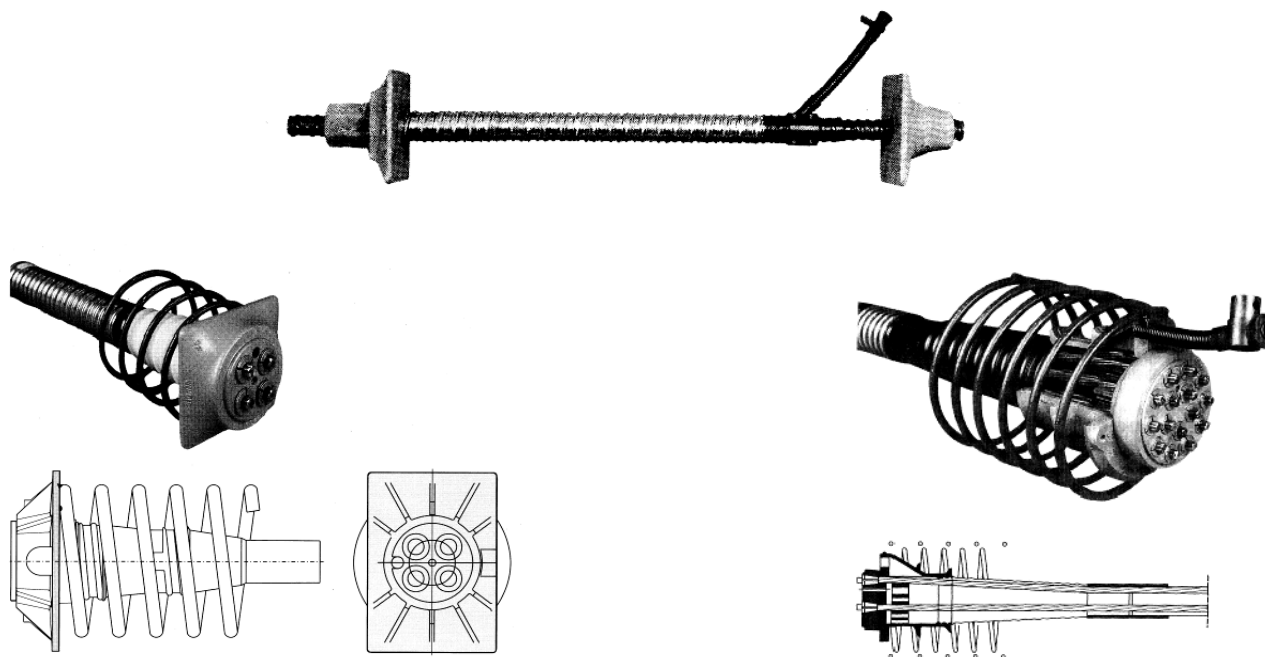


Bild 7-10 Spannanker [Empelmann 2010]

- oben: Spannglied mit Ankerplatte und Mutter
- unten links: Spannglied mit Keilverankerung und Ankerplatte
- unten rechts: Spannglied mit Keilverankerung und Mehrfachankerplatte

Feste Anker werden direkt in den Beton einbetoniert und müssen entsprechend verkeilt oder durch Auffächerungen verankert werden (Bild 7-11).

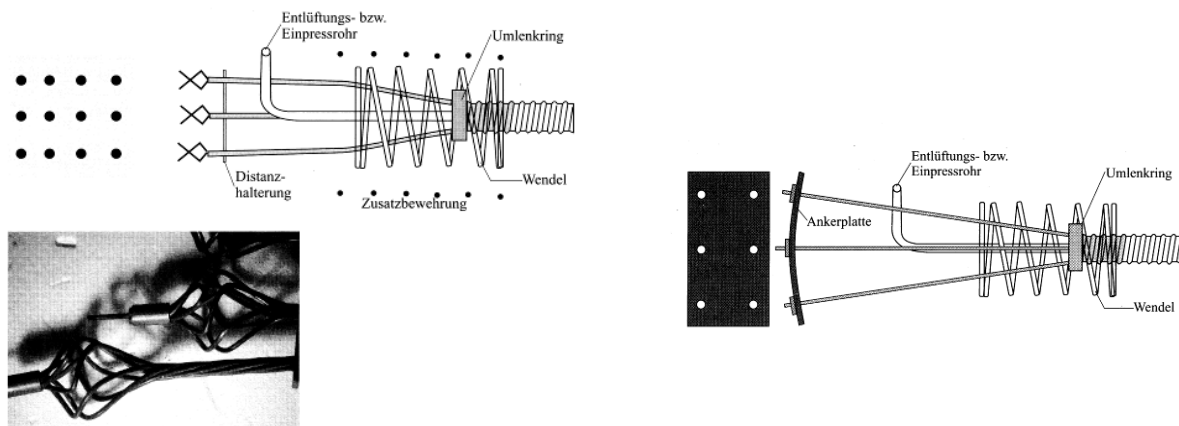


Bild 7-11 Festanker [Empelmann 2010]

links: gewellte und verdrehte Drahtenden

rechts: Auffächerung mit Ankerplatte

Bild 7-12 und Bild 7-13 zeigen Beispiele für ausgeführte Spanngliedverankerungen.

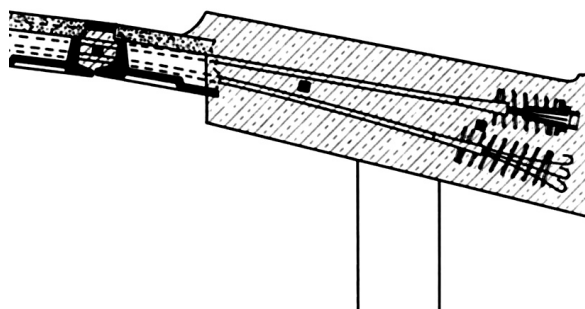


Bild 7-12 Verankerung der Spanngliedverankerung eines gegenseitig gekrümmten Dachs mit Fest- und Spannanker, Knapsack-Feierabendhaus Hürth, Architekt: Karl Hell (BNr. 21) [Born 1964]

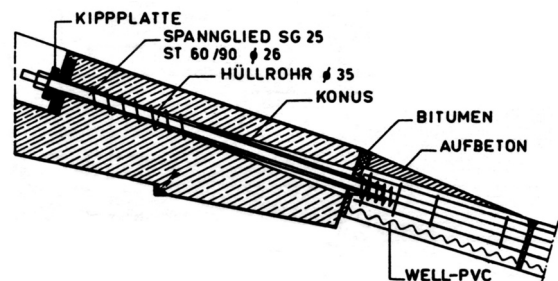
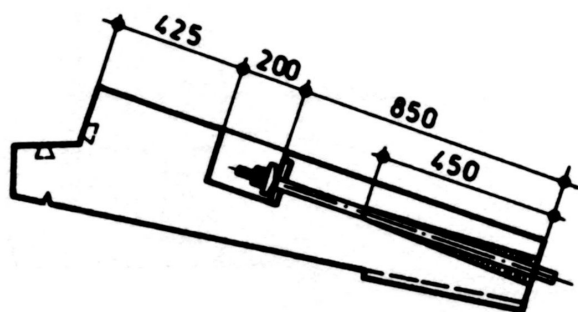


Bild 7-13 Sportschwimmbhalle Dresden, Architekten: Nichtitz, Kaltenbrunn, Jackowski (BNr. 22) [Rickenstorf 1982]

links: Seilverankerung mit Ankerplatte in einer Aussparung im Randträger

rechts: Übergang Randträger – Dachfläche

Bei der Verankerung des Spannglieds im steifen Randträger ist durch konstruktive Maßnahmen eine ungewollte Querbeanspruchung zu vermeiden, die infolge der Verformung der Dachfläche entstehen kann. Das lokale Abknicken des Spannglieds kann verhindert werden, wenn der Spannkanaal in diesem Bereich konusförmig aufgeweitet wird und damit die zwängungsfreie Beweglichkeit der Dachfläche ermöglicht.

Bei der Westfalahalle 4 in Dortmund (Bild 7-14) wurde der Spalt zwischen Randträger und Dachfläche mit einem Gelenkstreifen aus Blei überbrückt, der auch Druckkräfte übertragen kann.

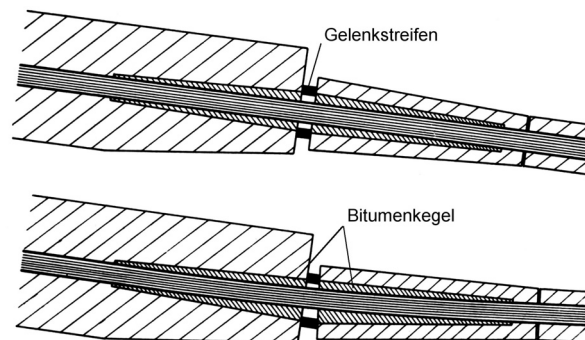


Bild 7-14 Verformbarer Anschluss des Daches an die Randträger
 oben: Spanngliederlauf bei unverformter Dachfläche
 unten: Spanngliederlauf bei verformter Dachfläche
 Westfalahalle 4 Dortmund (BNr. 16) [Vaessen 1959]

Die Verankerung von Spanngliedern in Randträgern mit Hilfe spezieller Ankerkörper ist bei Berücksichtigung der konstruktiven Randbedingungen sicher und mit begrenztem Aufwand möglich. Hierbei müssen jedoch insbesondere die für Hängedächer typischen großen Verformungen der Dachfläche beachtet werden.

7.4 Stahlprofilträger-Anschlüsse

Profilstäbe in Form von Band-, Rund- oder Walzquerschnitten werden als Zugelemente in Hängedächern verwendet. Um eine ausreichende Biegeweichheit zu gewährleisten, kommen dabei sehr schlanke Profile zum Einsatz. Die Anschlüsse der Zugelemente an die Verankerungskonstruktionen werden zudem in der Regel gelenkig ausgeführt.

Zweckmäßige Ausführungen zum Anschluss sind Gabelenden mit Bolzenverbindungen (Bild 7-15 und Bild 7-16) oder auch Steckanschlüsse (Bild 7-17).



Bild 7-15 Anschluss des Flachstahl-Zugelements an den Knoten des Fachwerk-Randträgers mit Gabelende und Bolzenverbindung, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]



Bild 7-16 Gelenkiger Anschluss des Doppel-T-Hauptzugelements am Kopf des Auflagerbocks mit Gabelende und Bolzenverbindung, Neue Messe Stuttgart, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35)

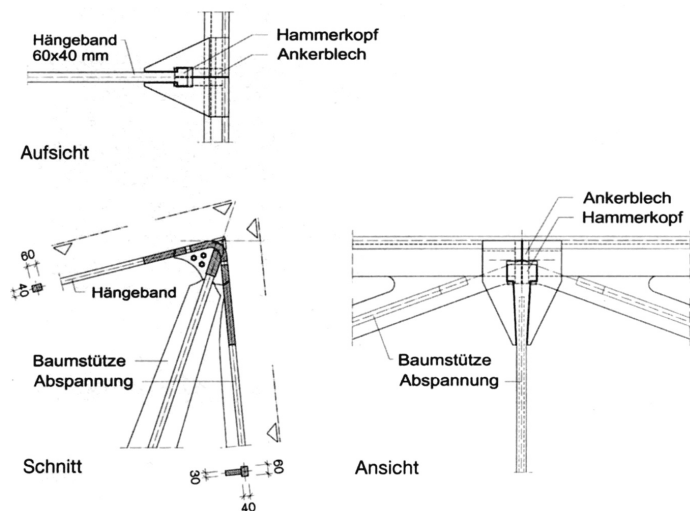


Bild 7-17 Verankerungsdetail des Hängebands

links: Ankerbleche am Fachwerk-Randträger

rechts: Kopfpunktdetails mit Steckanschluss des Hängebands

Römertherme Baden, Architekten: Nemetz, Junger, Weber, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 66) [Schober 2003]

7.5 Blechanschlüsse

In Blechdächern ist die tragende Funktion mit der der Dacheindeckung vereint. Die Anschlüsse der flächigen Zuelemente sind nicht punktuell sondern linienförmig. Die Verbindung einzelner Bleche untereinander bzw. an stählerne Randträger erfolgt in der Regel durch Schweißen. Da Schweißen in Höhenlage des Daches jedoch schwierig ist, bedürfen auch diese Anschlüsse einer möglichst weitgehenden Vorbereitung im Werk.

Beim Anschluss an Randträger aus Metall oder Holz sind zur Verbindung Scher-Lochleibungs- und vorgespannte Schraubverbindungen einsetzbar. Anschlüsse an Betonbauteile können auch durch direkten Verbund erzielt werden. In Bild 7-18 ist der Anschluss des Blechdachs an den äußeren Betondruckring der Rundhalle in Gleisdorf dargestellt. In die Fertigteilsegmente des Rings wurden werkseitig die durch aufgeschweißte Streben verstärkten Randbereiche der Tragbleche einbetoniert. Nach der Montage der Segmente erfolgt der Anschluss des nächsten, weiter innen liegenden Blechsektors der Dachhaut durch Schweißung von oben gegen eine vorgefertigte Lasche.

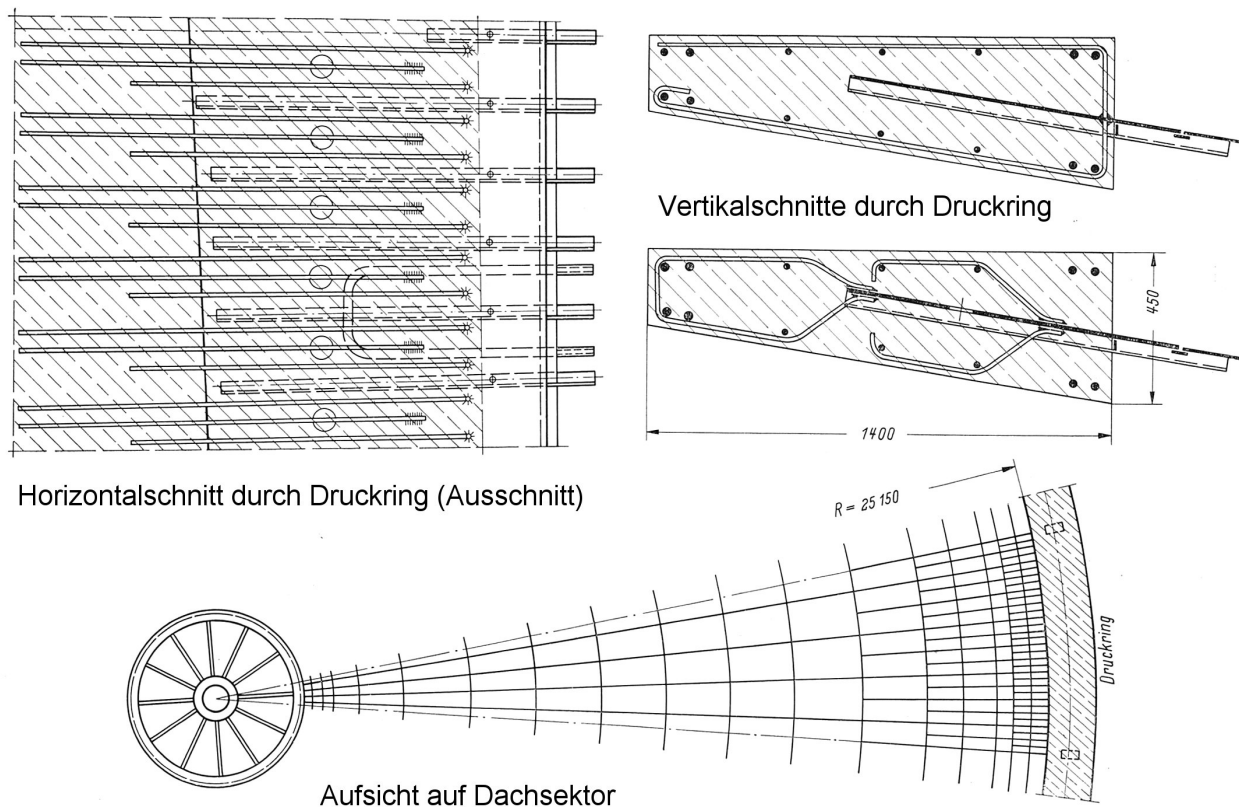


Bild 7-18 Horizontal- und Vertikalschnitte durch Druckring mit einbetoniertem Anschlussblech (oben), Darstellung eines Dachsektors (unten), Rundhalle Gleisdorf, Ingenieure: Koss, Beer (BNr. 65) [Beer 1963]

7.6 Holzanschlüsse

Ein weiterer geeigneter Baustoff für Zuelemente in Hängedächern ist Holz, das in Form von Holzwerkstoffplatten, runden oder eckigen Vollholzquerschnitten oder Brettschichtholzbändern

eingesetzt werden kann. Damit die Dachlasten nur über Zug und nicht zusätzlich über Biegung abgetragen werden, kommen nur sehr schlanke, beidseitig gelenkig gelagerte Holzprofile zum Einsatz. In der Regel erfolgt der Anschluss von Holz- oder Holzwerkstoffquerschnitten über Scher-Lochleibungsverbindungen unter Verwendung von Stahlformteilen.

Bild 7-19 zeigt die Anschlussdetails der Dachbahnen des Werkhofs der Stadtwerke in Hohenems (vergleiche auch Bild 6-19 und Bild 6-20, S. 146). Die Anschlüsse bestehen aus Nagelverbindungen mit Stahlformteilen und sind einseitig mit einem Gewindestab justierbar. In Bild 7-20 ist der gelenkige Anschluss einer BSH-Hängerippe mittels Passbolzen und Stabdübeln am Beispiel der Fertigungspavillons in Bad Mündersheim von 1987 dargestellt.

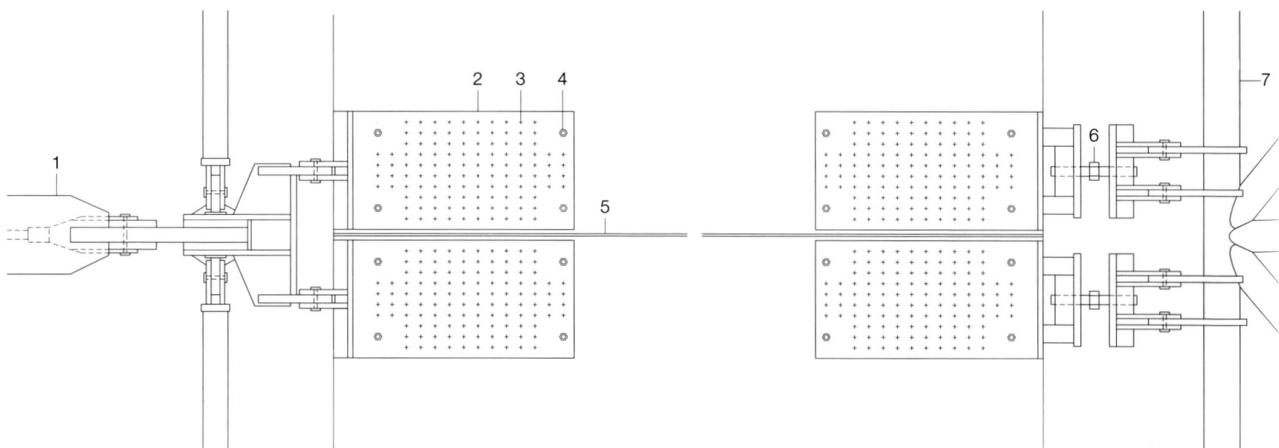
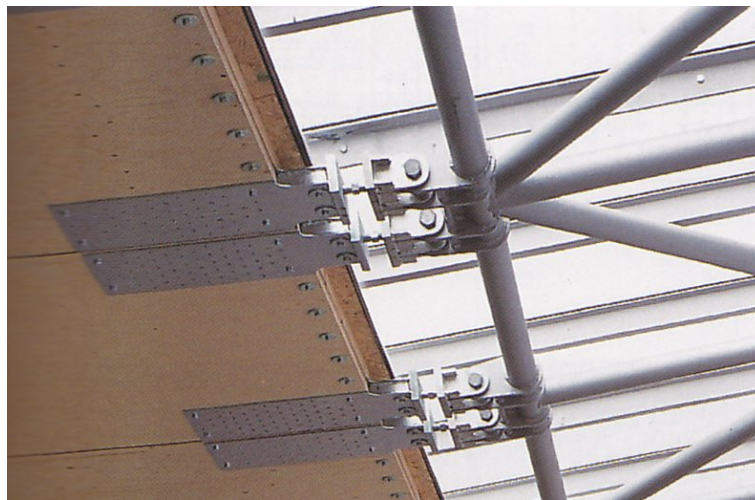


Bild 7-19 Untersicht Elementstoß mit Anschlussblechen

- 1** Stahlprofile IPE 200
- 2** Stahlblech
- 3** Rillennägeln 4/40 mm von unten und oben versetzt genagelt
- 4** Passbolzen Ø 12 mm
- 5** Elementstoß Holzpaneel
- 6** Gewindestahl mit aufgeschweißter Mutter Ø 36 mm
- 7** Fachwerkträger Untergurt Stahlrohr Ø 101,6/12,5 mm

Werkhof der Stadtwerke Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Detail 2001]

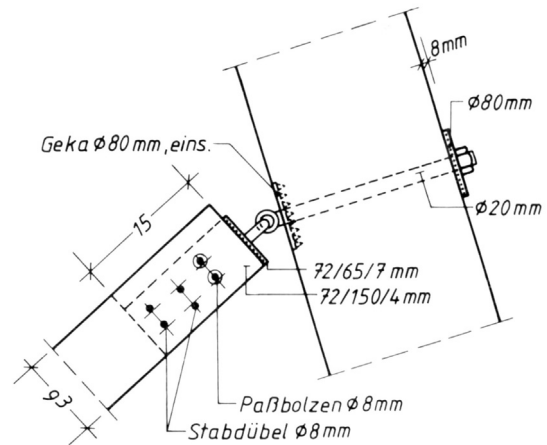


Bild 7-20 Anschluss Hängerippe an Rahmenriegel

links: Dachuntersicht [Foto-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig]

rechts: Anschlussdetail [Speich 1988]

Fertigungspavillons Bad Münster-Eimbeckhausen, Architekten: Frei Otto, Christine Otto-Kanstinger, Ingenieure: Speich, Hinkes (BNr. 13)

Für den Anschluss von Zuelementen aus Holz oder Holzwerkstoffen stehen zahlreiche Verbindungsmittel des Ingenieurholzbaus zur Verfügung. Neben der Verformungsfähigkeit ist insbesondere der Dauerhaftigkeit des Anschlusses Beachtung zu schenken.

7.7 CFK-Verankerungen

Faserverstärkte Kunststoffe bieten ein großes Potential für den Einsatz als Zuelemente von Hängedächern. Bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) stellen die Verankerungen besonders kritische Punkte dar, da CFK im Gegensatz zu Stahl ein anisotropes und vergleichsweise sprödes Materialverhalten aufweist. In Längsrichtung können von den Fasern sehr hohe Zug- und Druckkräfte aufgenommen werden, der umgebende Kunststoff dient nur der Stabilisierung. In Querrichtung ist die mechanische Beanspruchbarkeit jedoch gering.

CFK-Werkstoffe sind sehr anfällig für hohe Querpressungen und Kerbbeanspruchungen. Selbst bei Klemmverbindungen, bei denen die Kräfte des CFK-Zugbands über Reibung in Stahlklemmplatten geleitet werden, wird der Verbundwerkstoff ungleichmäßig beansprucht, so dass die Tragfähigkeit des Querschnitts reduziert wird (Bild 7-21). Um die Kräfte möglichst gleichmäßig einzuleiten, ist die Anordnung mehrerer in Reihe geschalteter Klemmstreifen möglich, die durch dehnbare Bereiche voneinander getrennt werden. Gegebenenfalls können zusätzlich Klebungen ergänzt werden („Dehnungs-Klemm-Anker“, Bild 7-22).

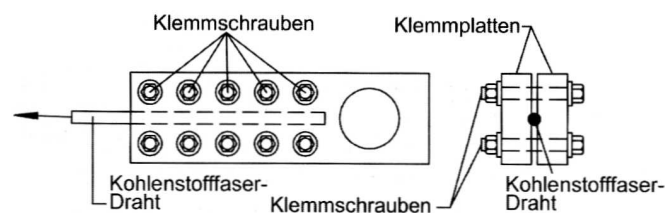


Bild 7-21 Verankerungsklemme zur Verankerung eines Kohlenstofffaser-Drahts [Bergmeister 2003]

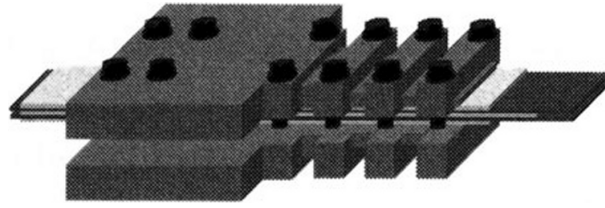


Bild 7-22 „Dehnungs-Klemm-Anker“ für Kohlenstofffaserlamellen [Schlaich 2007]

Darüber hinaus ist der Einsatz verschiedener Ausführungen von Verguss- oder Keilverankerungen möglich, die so konstruiert sind, dass über verschiedene Materialien sowohl der Keile als auch der Füllmatrix eine möglichst gleichmäßige Schubbeanspruchung des Zuelements im Verankerungsbereich erzielt wird. Bild 7-23 bis Bild 7-25 zeigen verschiedene Ausführungsmöglichkeiten.

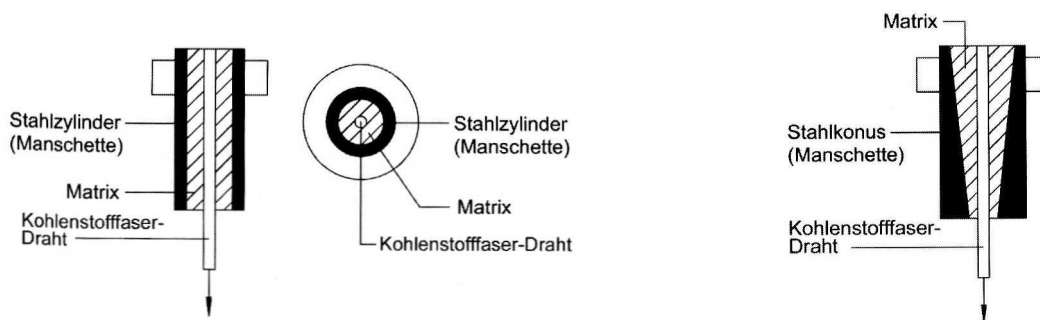


Bild 7-23 Zylindrische (links) und konische Verankerungsmanschette (rechts) für Kohlenstofffaserdrähte [Bergmeister 2003]

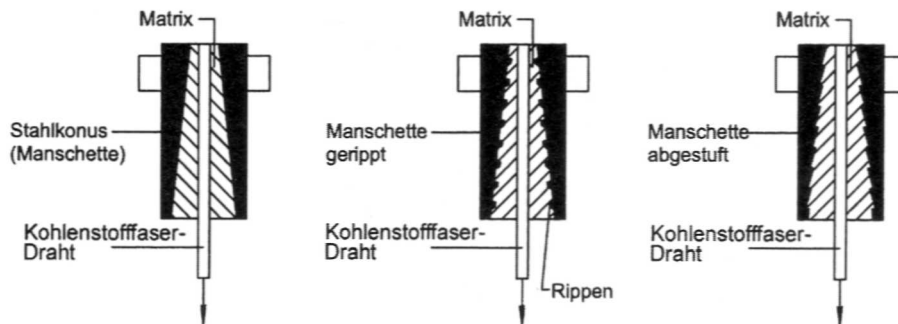


Bild 7-24 Konische Verankerungen für Kohlenstofffaserdrähte mit Rippen und Abstufungen [Bergmeister 2003]

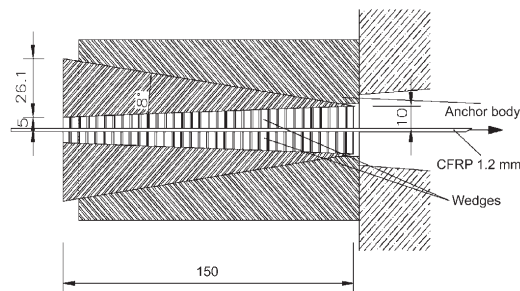


Bild 7-25 Keilverankerung („Composite wedge system“) für Kohlenstofffaserdrähte [Schlaich 2007]

Eine weitere Verankerungsvariante, bei der die Kraftübertragung nicht über Haftverbund erfolgt, ist die so genannte „Strangschlaufe“ (Bild 7-26). Dabei wird eine dünne Lamelle mehrmals über zwei gegenüberliegende Verankerungsbolzen gewickelt. Es entsteht ein mehrlagiges Band, das nur an seinen Enden mit der darüber bzw. darunter liegenden Lage verschweißt wird. In Abhängigkeit vom Umlenkradius des Verankerungsbolzens müssen die aufnehmbaren Spannungen der CFK-Schlaufe abgemindert werden. Diese Verankerungsart wurde bei der Versuchs-Spannbandbrücke an der TU Berlin (siehe Bild 6-18, S. 143) genutzt und zeigte dabei eine gute Eignung.

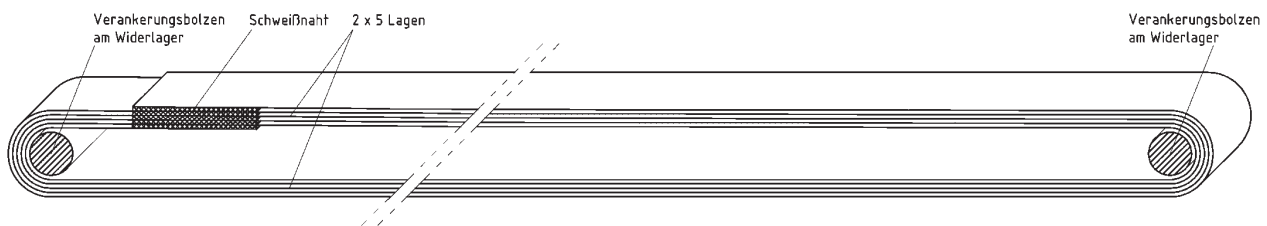


Bild 7-26 „Strangschlaufe“ für Kohlenstofffaserlamellen [Schlaich 2007]

Zur Verankerung von Zugtragelementen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen bestehen wie vorgestellt verschiedene Möglichkeiten. Dem Einsatz dieser hoch leistungsfähigen Zugglieder in zukünftigen Hängedächern stehen daher keine grundsätzlichen technischen Problemstellungen entgegen.

8 Bauphysikalische Entwurfsaspekte

8.1 Entwässerung

Da sich die Dachform von Hängedächern entsprechend der Belastung einstellt, ist für eine sichere Dachentwässerung zu gewährleisten, dass selbst im ungünstigsten Belastungsfall keine Wassersackbildung eintritt. Abhängig von der Dachgeometrie erfolgt die zweckmäßige Ableitung des Regenwassers auf unterschiedliche Weise.

Am günstigsten sind sehr steile Dächer, bei denen das niedrigere Randauflager gleichzeitig den tiefsten Punkt des Daches darstellt (vgl. Bild 4-44, S. 79). Jede Stelle des Daches hat somit ein ausreichendes Gefälle, die Entwässerung erfolgt in Richtung des niedrigen Randes. Aufgrund der besonderen Dachgeometrie ist bei diesen Hängedächern eine konventionelle Ausführung der Entwässerung möglich und die Gefahr der Wassersackbildung sehr gering.

In Bild 8-1 sind zwei gebaute Beispiele, das c-Office in Nagoya und eines der drei etwa baugleichen Gebäude auf dem Forum Europaplatz in Castrop-Rauxel, mit großem Gefälle in Dachlängsrichtung dargestellt.

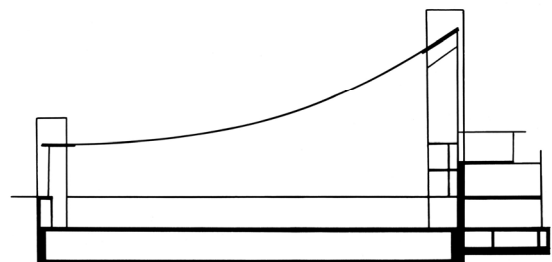
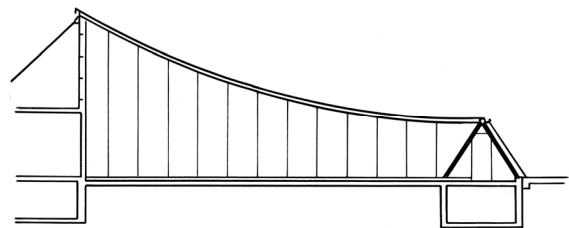


Bild 8-1 Hängedächer mit großem Dachlängsgefälle, Dachentwässerung über den Tiefpunkt am Auflagerrand
 oben: c-Office Nagoya, Architekten: FT Architects, Ingenieure: Tada, Otsuka, Okada (BNr. 97) [Cellarius 2004]
 unten: Forum Europaplatz Castrop-Rauxel, Architekt: Arne Jacobsen (BNr. 15)

Die Entwässerung von Hängedächern kann ebenfalls über ein Quergefälle gesteuert werden. Dabei wird die Dachgeometrie so ausgebildet, dass die Verbindungslinie der Dachtiefpunkte ein Gefälle zu einer oder zu beiden Längsseiten aufweist. Diese Eigenschaft der Dachfläche lässt sich bei konstanten Seillängen durch unterschiedlich hohe Seitenränder oder durch Zugelemente mit variieren-

den Längen erreichen. Die Länge der Zugelemente wird dabei so gewählt, dass deren Durchhang in der gewünschten Entwässerungsrichtung zunimmt.

Bild 8-2 zeigt am Beispiel der Sportschwimmhalle Dresden eine Gefälleausbildung mit unterschiedlichen Längen der Zugelemente. Bild 8-3 zeigt die Westfalenhalle 4 in Dortmund, bei der das Dachgefälle zu den Längsseiten durch den Verlauf der Auflagerlinien ausgebildet wird.

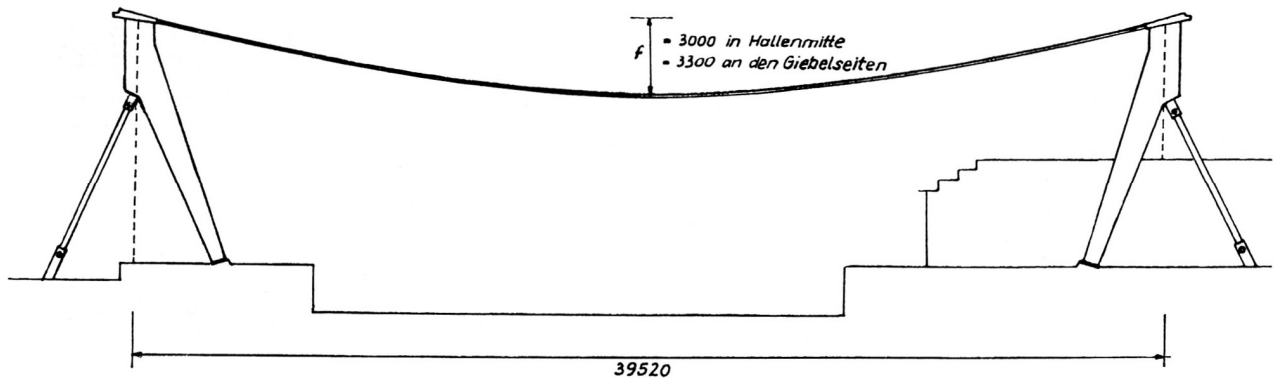


Bild 8-2 Hängedach mit Ausbildung eines Gefälles durch unterschiedlich Längen der Zugelemente
 oben: Längsschnitt durch die Halle [Quade 1969]
 unten: Ansicht auf die Längsseite mit Dachabflüssen
 Sportschwimmhalle Dresden, Architekten: Nichtitz, Kaltenbrunn, Jackowski (BNr. 22)

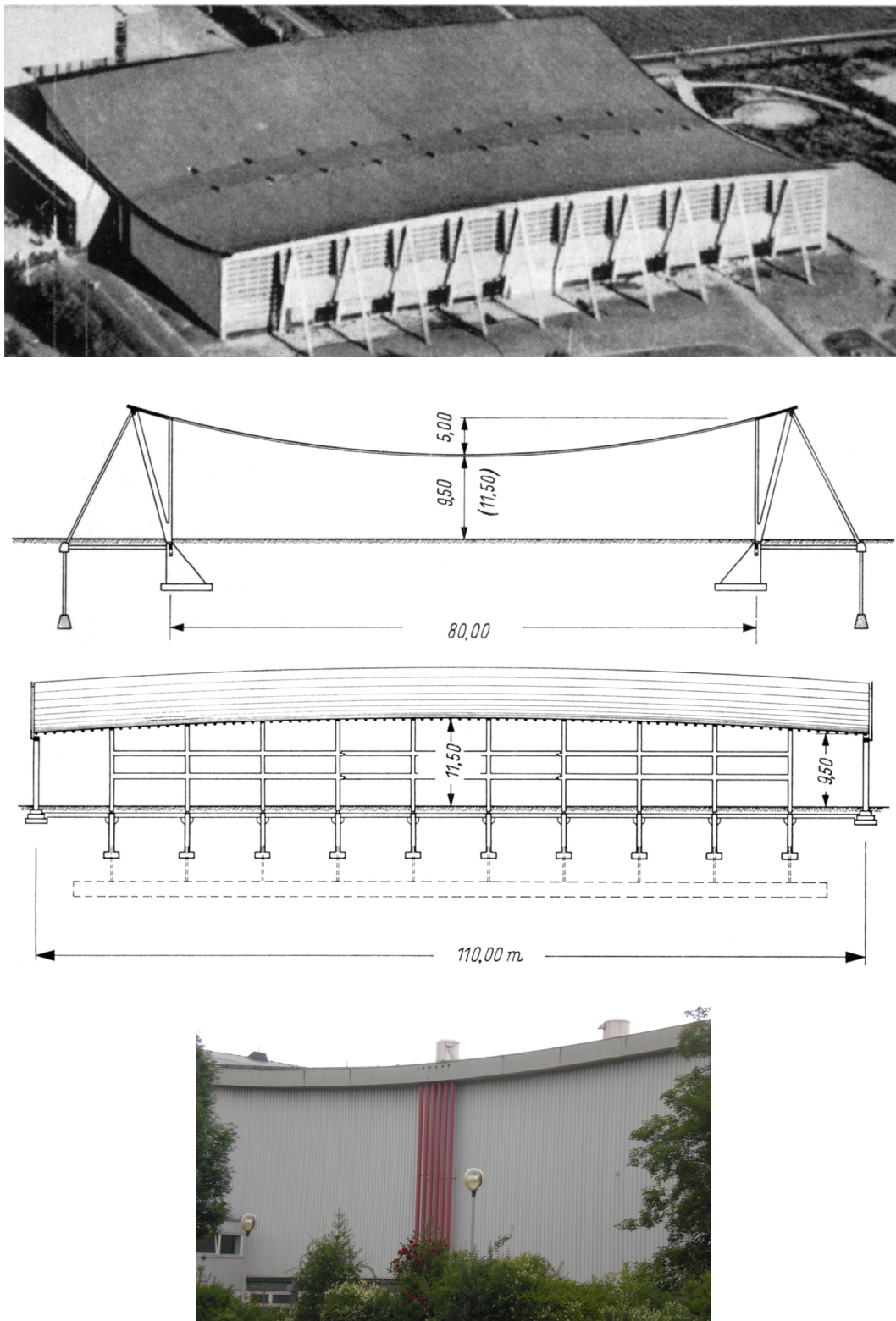


Bild 8-3 Hängedach mit Ausbildung eines Gefälles durch veränderliche Höhen der Auflagerlinien
 oben: Luftbild [Otto 1966]
 mittig: Quer- und Längsschnitt [Vaessen 1959]
 unten: Fallrohre im Tiefpunkt der Längsseite
 Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16)

Weitere Details zur Ausführung der Entwässerung, die auch einen Teil des architektonischen Entwurfs darstellen, sind in Bild 8-4 und Bild 8-5 dargestellt.



Bild 8-4 Hängedach mit Dachflächenentwässerung über Quergefälle zu Wasserspeier an den Längsseiten, Maison de la Culture Firminy, Architekt: Le Corbusier (BNr. 53) [Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig] [Boesinger 1986]

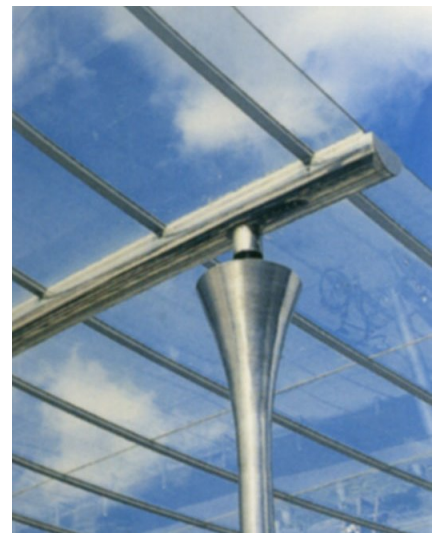
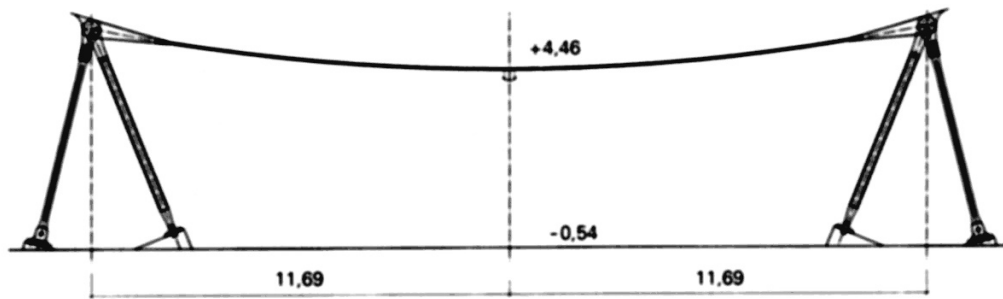


Bild 8-5 Hängedach mit Dachflächenentwässerung über Quergefälle zu Fallrohr am Längsrand
oben: Längsschnitt durch die Dachfläche
unten: Rinnenuntersicht, Fallrohr
Bahnhofsvordach Ulm, Architekten: Jauss + Gaupp, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 36) [Bögle 2005]

Problematischer ist die Ableitung des Wassers bei Hängedächern über kreisrundem Grundriss ohne Mittelunterstützung. Da der Tiefpunkt im Zentrum des Daches liegt, muss das sich dort sammelnde Wasser über angehängte Rinnen unter dem Dach von der Mitte zu den Gebäudeaußenseiten geleitet werden. Dieses Verfahren führt zu erhöhten Lasten für das Dach sowie zu einer ästhetischen Beeinträchtigung. Theoretisch wäre auch ein direktes Fallrohr senkrecht durch die Mitte des Raumes möglich, hätte allerdings den unerwünschten Nachteil, dass der Raum an zentraler Stelle verbaut wäre. Bild 8-6 und Bild 8-7 zeigen Beispiele für die Entwässerung von Hängedächern über kreisrundem Grundriss.

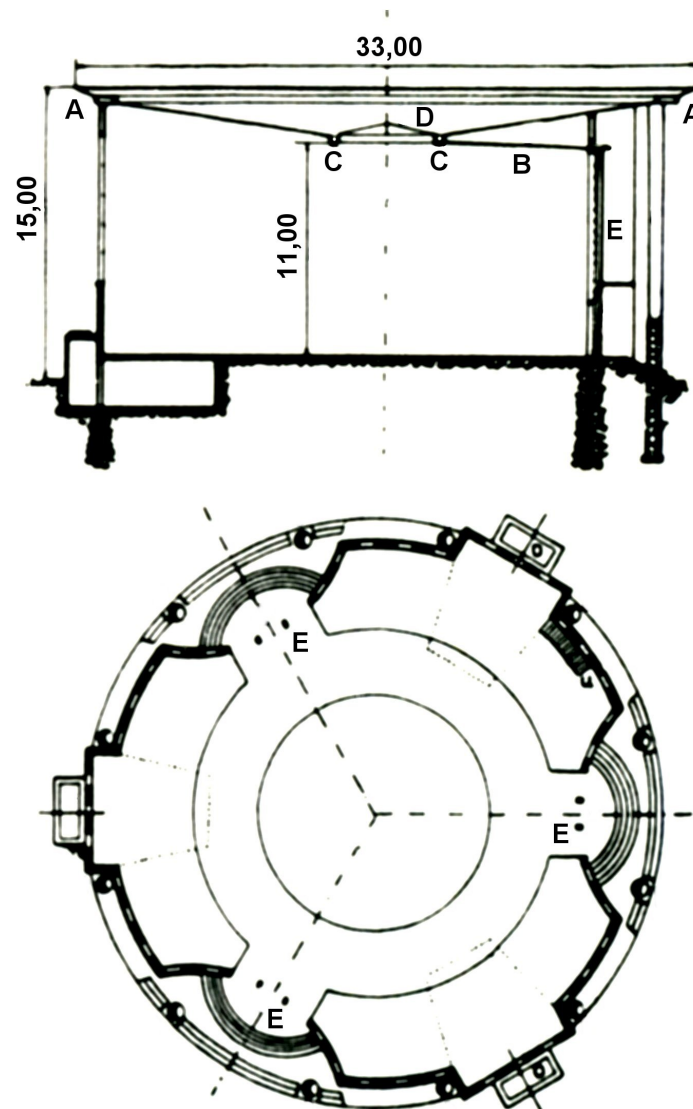


Bild 8-6 Entwässerung vom Innenring über drei angehängte Rinnen nach außen, Schnitt (oben) und Grundriss (unten)
Ringkastenträger (A), radiales Kastengerinne (B), innerer Ring, zugleich Rinne (C), Laterne (D)
Zwillingsfallrohr im Eingangsbereich (E)
Französischer Pavillon Zagreb, Architekt: Camelot, Ingenieure: Herbé, Laffaille
(BNr. 62) [Otto 1954]

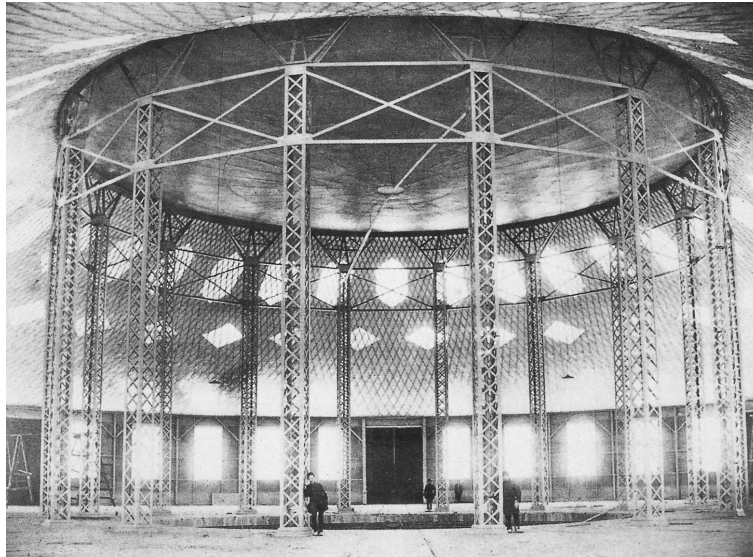


Bild 8-7 Entwässerung des Blechhängedachs über zwei Rohre an der Unterseite von der Mitte zu den Stützen des Innenrings, Rotunde Allrussische Ausstellung, Ingenieur: Schuchow (BNr. 92) [Picon 1997]

Einwirkungen aus Schnee und Eis sowie die hieraus resultierenden Verformungen können maßgebend für die Bemessung eines Hängedachs werden. Um die Schnee- und Eislasten zu begrenzen, kann durch eine Dachhautheizung verhindert werden, dass sich größere Schneemengen anhäufen (Ausführung z. B. beim Sportpalast in Dijon, BNr. 52). Für leichte, ungedämmte Dächer besteht die Möglichkeit, zu hohe Schneeanhäufungen abzutauen, indem die Innenräume beheizt werden.

Aufgrund der charakteristischen Dachform und der starken Verformbarkeit von Hängedächern ist der Entwässerung eine besondere Beachtung zu schenken. Die geeignete Ausbildung der Dachentwässerung hängt maßgeblich von der Dachform ab und ist auch aufgrund möglicher räumlicher Beeinträchtigungen bereits in der Entwurfsphase in die Planung einzubeziehen.

8.2 Belichtung und Belüftung

Gebäudeöffnungen können sowohl in den Außenwand- als auch in den Dachflächen angeordnet werden. Bei Gebäuden mit Hängedächern bieten sich durch die besondere Dachform interessante Optionen, den darunter liegenden Raum zu belichten und zu belüften.

Bei der konventionellen Belichtung und Belüftung von Hochbauten mit Hängedach werden Fenster und Türen in den massiven Außenwänden angeordnet (siehe Bild 8-8 bis Bild 8-11).



Bild 8-8 Fenster- und Türöffnungen bei einem Wohnhaus in Banská Bystrica, Ingenieur: Schnirch (BNr. 68) [Ferjenčík 1992]



Bild 8-9 Stirnseite mit Toren und hoch angeordneten Fenstern, Getreidelagerhalle Albany, Architekt: James Stewart (BNr. 73) [Otto 1954]



Bild 8-10 Massive Außenwände mit hohen, schlanken Fenstern, Französischer Pavillon Zagreb, Architekt: Camelot, Ingenieure: Herbé, Laffaille (BNr. 62) [Picon 1997]

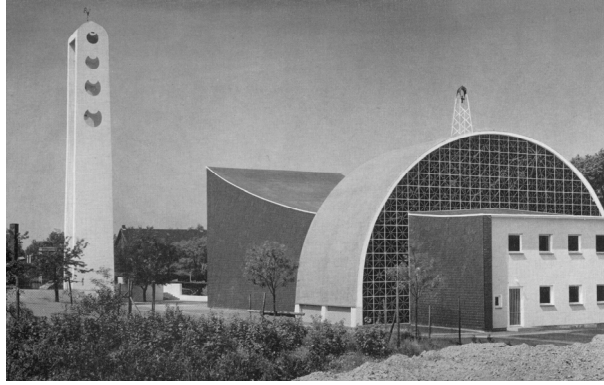


Bild 8-11 Stirnseite mit Tür und Fenstern, St. Paulus Kirche Velbert, Architekt: Böhm, Ingenieur: Wolf, (BNr. 19) [Weyres 1957]

Da Hängedächer nur selten im Wohnungsbau wie beim Wohnhaus in Banská Bystrica eingesetzt werden, sondern vorwiegend zur Überdachung von Gebäuden großer Spannweite wie beispielsweise Hallen und Stadien genutzt werden, kommen konventionelle Fenster nur selten zum Einsatz bzw. werden durch weitere Öffnungen ergänzt (siehe St. Paulus Kirche, Bild 8-21, S. 191).

Hängedächer bieten aufgrund ihres geringen Dachgewichts den Vorteil, dass sie nur Tragelemente geringer Abmessungen für den vertikalen Abtrag der Dachlasten benötigen, die Längsseiten bei einachsiger verlaufenden Zugelementen zudem weitgehend frei von statischen Konstruktionselementen bleiben. Daher können die Umfangs- bzw. Längs- und Stirnseiten den Anforderungen entsprechend auch großflächig mit nur kleinen Unterbrechungen durch tragende Bauteile verglast werden (Bild 8-12 bis Bild 8-15).



Bild 8-12 Vollverglasung der Längsseiten, Teilverglasung der Stirnseiten (als Lichtband nur im oberen Bereich bzw. feldweise zwischen den Bockkonstruktionen), c-Office Nagoya, Architekten: FT Architects, Ingenieure: Tada, Otsuka, Okada (BNr. 97) [FT Architects]



Bild 8-13 Umlaufende Fassadenverglasung, Terminal Dulles International Airport, Architekt: Eero Saarinen (BNr. 78) [Saarinen 2005]

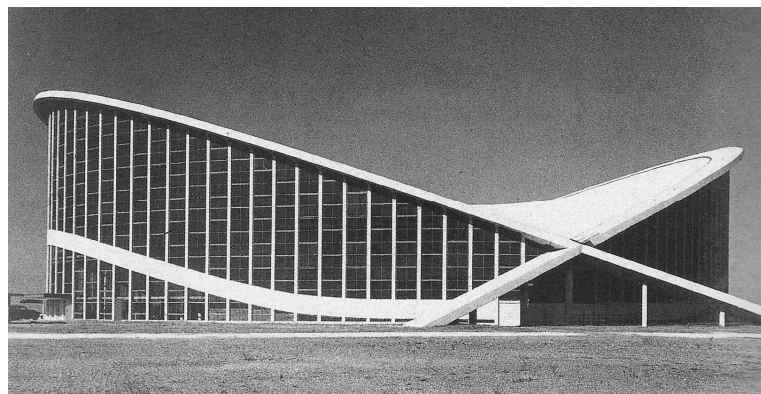


Bild 8-14 Umlaufende Fassadenverglasung bei gegenläufig gekrümmtem Dach, Raleigh-Arena, Architekten: Nowicki, Deitrick, Ingenieure: Severud, Elstad und Krueger (BNr. 79) [Picon 1997]

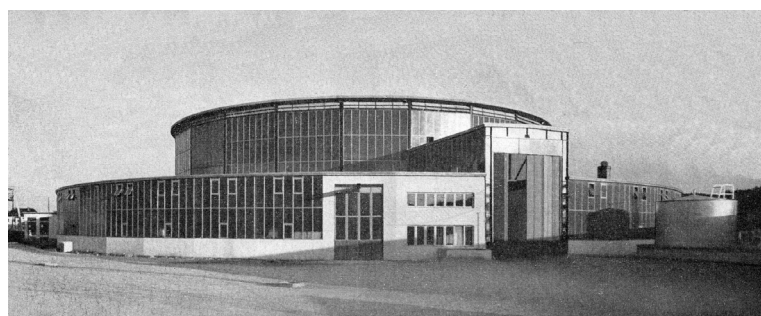


Bild 8-15 Umlaufende Verglasung bei kreisrundem Hängedach, Rundhalle Gleisdorf, Ingenieure: Koss, Beer (BNr. 65) [Beer 1963]

Zusätzlich zu Öffnungen oder Verglasungen in den Wandflächen bietet die Dachfläche der Hängedächer vielfältige Optionen zur Belichtung und Belüftung. Besonderheiten von Hängedächern, die bei der Planung, Bemessung und Ausführung von Öffnungen in der Dachfläche zu berücksichtigen sind, liegen in der gekrümmten Form der Dachflächen und in deren Verformbarkeit. Sowohl die Wahl der Materialien als auch die Detaillierung der Anschlüsse ist hierauf abzustimmen. Beispiele für Anschlusspunkte von Verglasungen zeigt Bild 8-16.

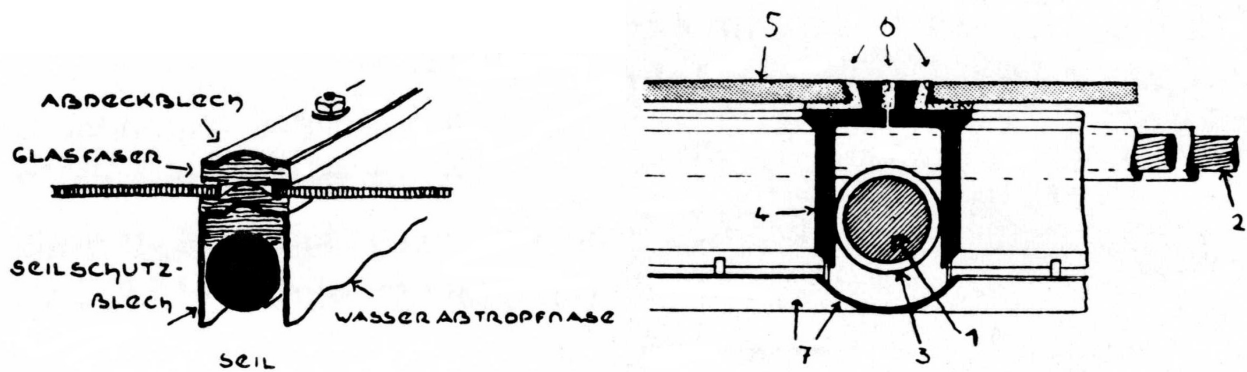


Bild 8-16 links: Detail einer Treibhausverglasung
rechts: Querschnitt durch eine wetterdichte Verglasung eines Seilnetzes mit Spiegelglas
1 Tragseil, 2 Spannseil, 3 Seilschutzschlauch, 4 Fensterrahmen,
5 geschliffenes Spiegelglas, 6 Spezialkitt, 7 Kondenswasserrinne [Otto 1954]

Eine im konventionellen Hochbau bewährte Ausführung von Dachöffnungen besteht in der Anordnung von einzelnen runden oder eckigen Oberlichtern. Aufgrund ihrer verhältnismäßig kleinen Abmessungen werden sie meist in großer Anzahl verwendet. Gebaute Beispiele mit kleinformatigen Oberlichtern in Hängedächern finden sich allerdings nur selten. Bild 8-17 und Bild 8-18 zeigen die baugleichen Sportschwimmhallen in Dresden und Potsdam mit Oberlichtern in der Hängedachfläche.

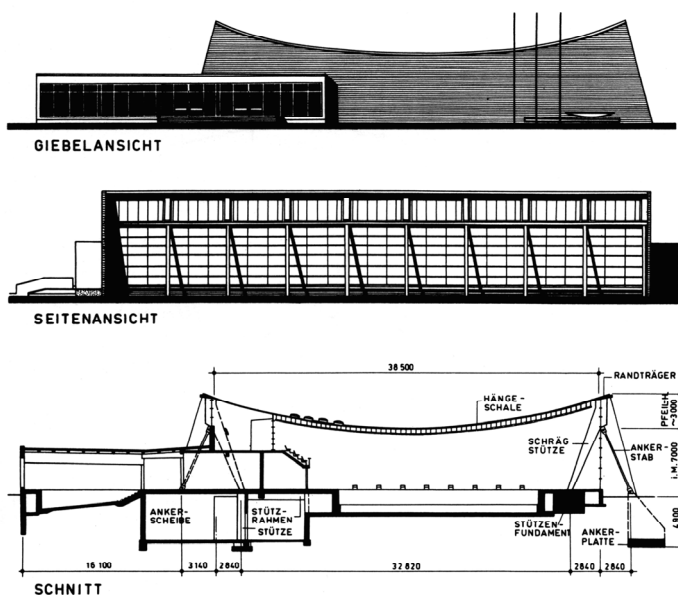


Bild 8-17 Hängedach mit Oberlichtern im Bereich der Zuschauertribünen (links), Entfall der Oberlichter nach umfassender Sanierung 2008 (rechts), Sportschwimmhalle Dresden, Architekten: Nichtitz, Kaltenbrunn, Jackowski (BNr. 22) [Rickenstorff 1982] [Google Earth]

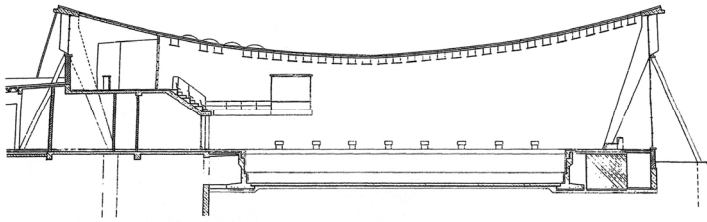


Bild 8-18 Hängedach mit bis heute erhaltenen Oberlichtern im Bereich der Zuschauertribünen, Sportschwimmhalle Potsdam, Architekt: Nichtitz (BNr. 9) [Böhme 2009] [Google Earth]

Eine weitere Variante von Dachöffnungen liegt im Aussparen oder Ersetzen der lichtundurchlässigen Dachhaut in abgegrenzten Bereichen der Dachfläche durch lichtdurchlässige Materialien. Verschiedene Beispiele zeigen Bild 8-19 bis Bild 8-21.

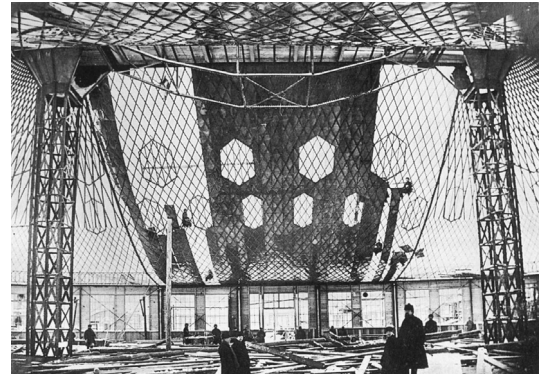


Bild 8-19 Anordnung von Oberlichtern bei durchlaufender Gitternetz-Tragstruktur
links: Außenansicht, rechts: Innenansicht im Bauzustand
Ovalbau Allrussische Ausstellung, Ingenieur: Schuchow (BNr. 94) [Graefe 1990-2]



Bild 8-20 Ausbildung eines einzelnen großen „Oberlichts“ durch Schließen des Auges der Seilnetzkonstruktion mit Acrylglas-Platten, Institut für Leichte Flächentragwerke Stuttgart (IL), Architekt: Frei Otto, Ingenieure: Leonhardt, Egger (BNr. 32) [Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU BS]

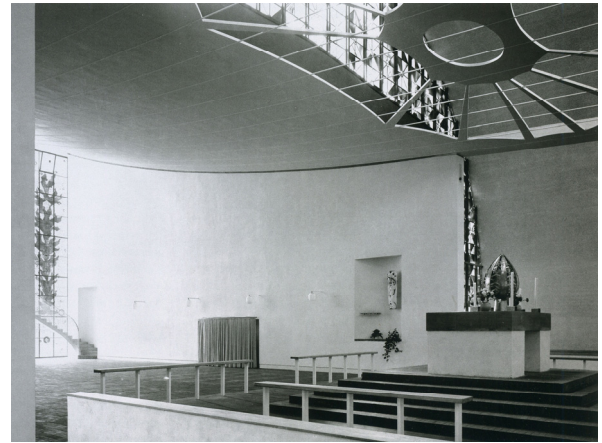
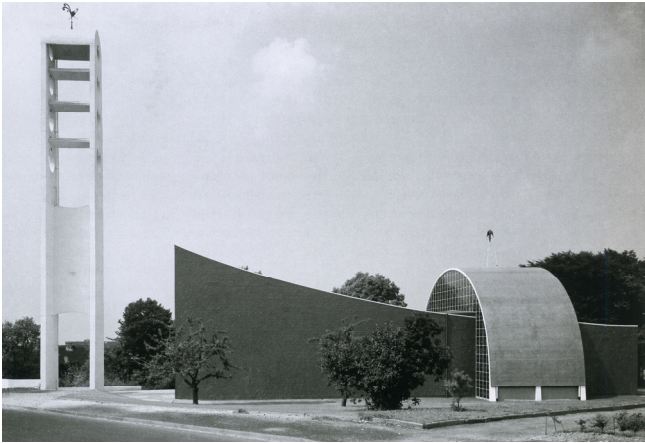


Bild 8-21 Beleuchtung des Kirchenraums durch fehlende Dachausfachung im Durchdringungsbereich mit der seitlich verglasten Halbtonne, St. Paulus Kirche Velbert, Architekt: Böhm, Ingenieur: Wolf (BNr. 19) [Voigt 2006]

Noch größere Bereiche lassen sich belichten, wenn Lichtbänder anordnet werden, die über die gesamte Längs- oder Querrichtung des Dachs verlaufen (Bild 8-22 bis Bild 8-24).

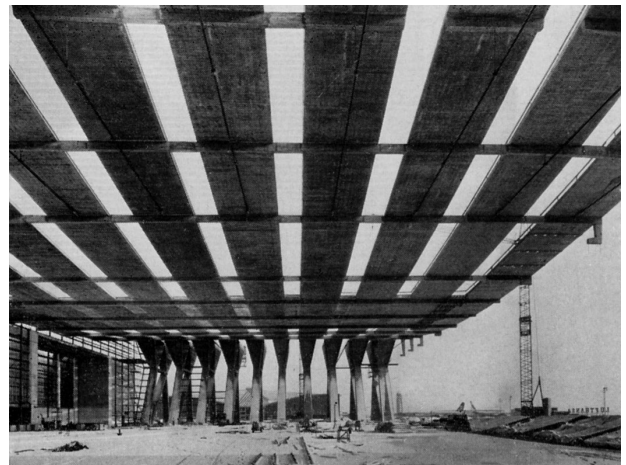


Bild 8-22 Oberlichtbänder parallel zur Lage der Hängebänder, Lufthansa-Wartungshalle Frankfurt, Architekten: Beckert und Becker, Ingenieur: Bomhard (BNr. 24) [Dechau 1990] [Thon 1970]



Bild 8-23 Anordnung von Lichtbändern parallel zur Spannrichtung, David L. Lawrence Convention Center Pittsburgh, Architekt: Rafael Viñoly (BNr. 77) [Pittsburgh]

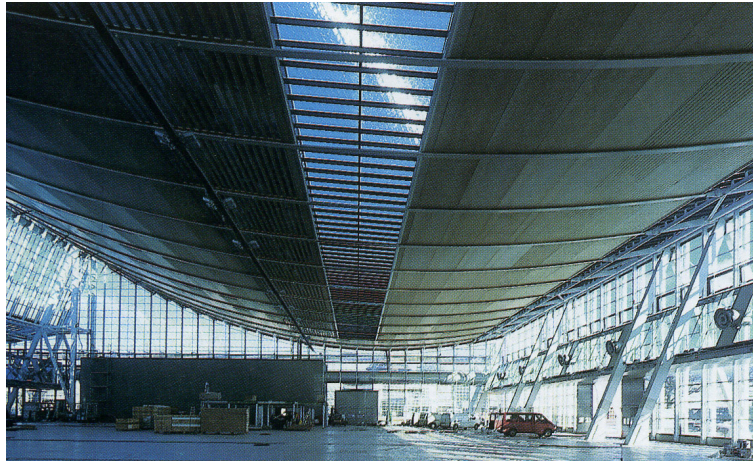


Bild 8-24 Oberlichtband am Dachtiefpunkt quer zur Spannrichtung, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

Ein „Spezialfall“ eines quer zur Spannrichtung verlaufenden Lichtbands zeigt das Hängedach des Fußballstadions in Braga (Portugal) von 2003. Die Tragseile spannen zwischen den Tribünenköpfen, sind aber nur im Bereich der Tribünensitzplätze mit Dachelementen aus Trapezblech und Stahlbeton eingedeckt. Oberhalb des Spielfeldes verlaufen nur die „nackten“ Stahlseile, so dass die Rasenfläche des Spielfeldes der Witterung frei ausgesetzt ist (siehe Bild 8-25).



Bild 8-25 Tragseile ohne und mit Eindeckung, Fußballstadion Braga, Architekt: Souto de Moura (BNr. 54) [Stock 2005]

Im Bereich von Randträgern, die in der Dachfläche liegen, ist eine Verglasung möglich, wenn die Randträger ausreichend biege- und dehnsteif sind und für die Durchlässigkeit optimalerweise einen aufgelösten Querschnitt aufweisen, z. B. ein Fachwerk.

Die Überdachung des Werkhofs der Stadtwerke in Hohenems kombiniert mehrere Belichtungselemente. Neben den verglasten Längsseiten wird die Halle über zwei Lichtbänder quer zur Spannrichtung belichtet. Hierzu wurde der Fachwerkträger am Rand der Hängedachfläche mit einer gläsernen Eindeckung versehen (in Bild 8-26 auf der rechten Hallenseite). Zusätzlich erhielt der an das Hängedach anschließende Teil des Dachs des Anbaus ein Lichtband (in Bild 8-26 auf der linken Seite). Bild 8-27 zeigt Detailausbildungen der beiden Lichtbänder.

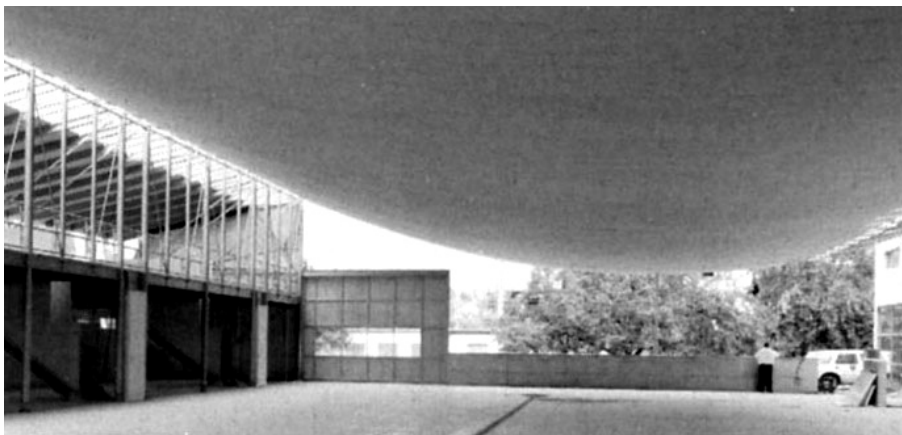
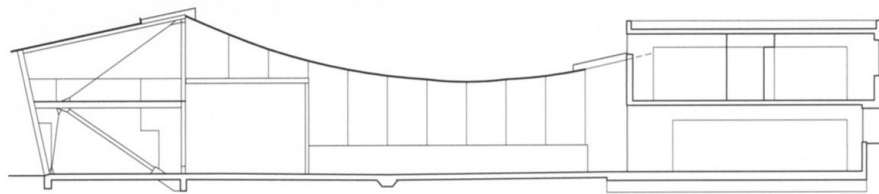


Bild 8-26 Belichtung über Glasfassaden an den Längsseiten sowie zwei Lichtbänder im Dach des Anbaus bzw. im Bereich des liegenden Fachwerk-Randträgers, Werkhof der Stadtwerke Hohenems, Architekt: Drexel, Ingenieur: Merz (BNr. 60) [Herzog 2003]

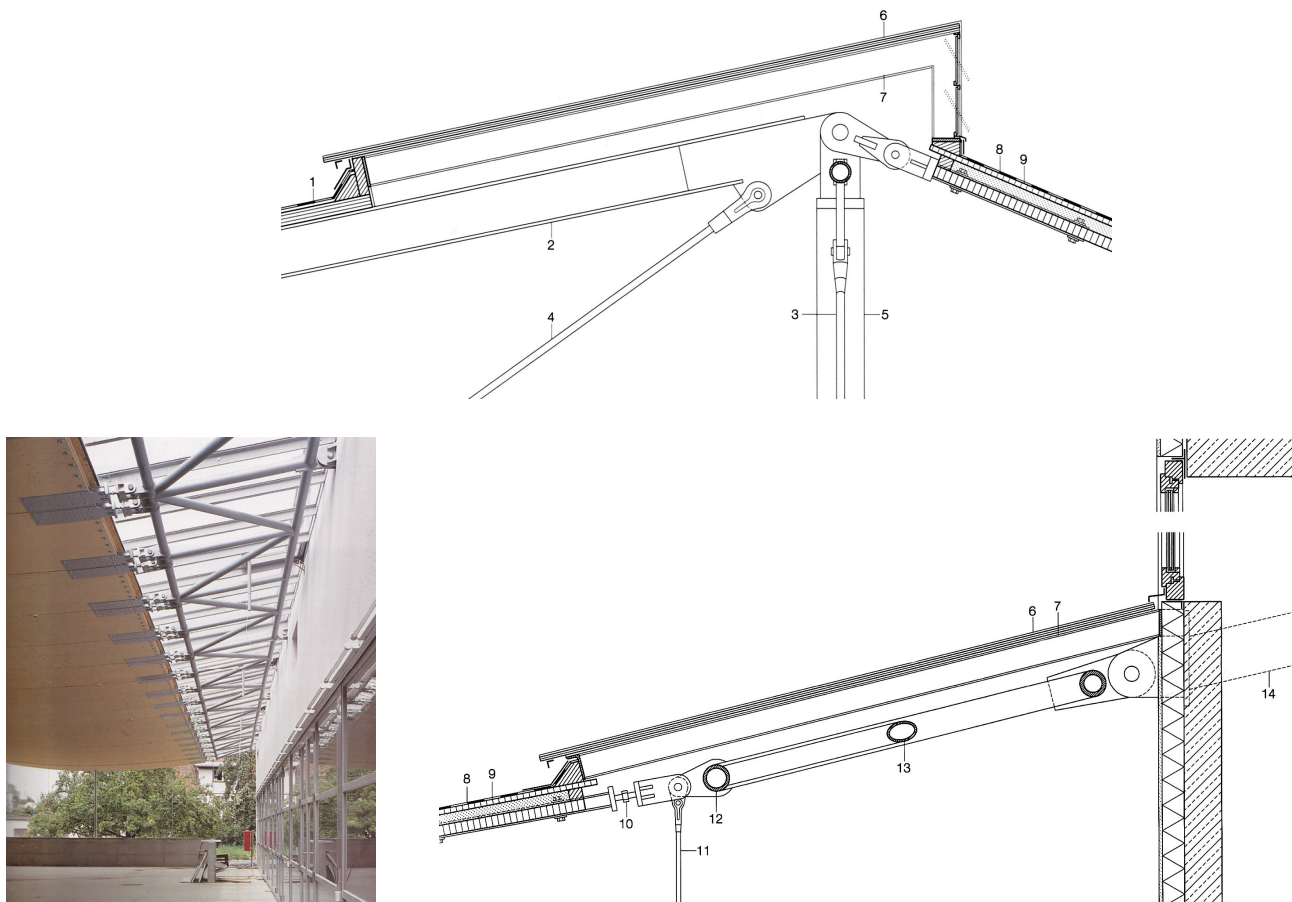


Bild 8-27 Detailausbildungen der Lichtbänder (BNr. 60) [Detail 2001]

oben: Lichtband im Dach des Anbaus

unten: Lichtband über dem Fachwerkträger

- 1 Dachaufbau Lagertrakt
- 2 Stahlprofil IPE 200
- 3 Zugstab Stahlrohr Ø 30 mm
- 4 Spannstange Betonrippenstahl 36 mm
- 5 Stütze Stahlrohr Ø 177,8/16 mm
- 6 Oberlicht VSG 2x5 mm Floatglas
- 7 Stahlprofil IPE 100
- 8 Bitumenbahn zweilagig, obere Lage beschiefert
- 9 Holzpaneel 1,8/18 m mit Splitfüllung
- 10 Gabelkopf mit Stellschraube zur Längenjustierung
- 11 Zugstab Rundstahl Ø 16 mm
- 12 Fachwerkträger Untergurt Stahlrohr Ø 101,6/12,5 mm
- 13 Fachwerkträger Diagonale Ø 76,1/6,3 mm
- 14 Rückverankerung Fachwerkträger

Auch bei der dreischiffigen Messehalle 26 in Hannover (Bild 8-28) wird neben den Lichtbändern in den Tiefpunkten (siehe Bild 8-24, S. 192) zusätzliches Tageslicht durch die jeweils beidseitig angeordneten verglasten Fachwerk-Randträger in den Hallenraum geleitet.

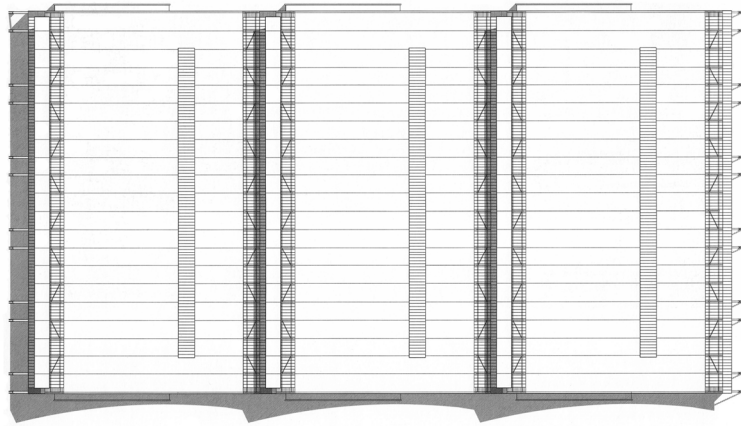


Bild 8-28 Dachaufsicht auf die dreischiffige Messehalle mit Oberlichtbändern in den Tiefpunkten und verglasten Randträgern, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

Zweischiffige Hängedächer, die sich im mittigen Hochpunkt von einem steifen Firstträger (eine Sonderform von zwei aneinander stoßenden Randträgern) abspannen, bieten die Möglichkeit, diesen Hochpunkt als Lichtband auszubilden. Bild 8-29 zeigt die Hängedachflächen der Halle 1 der Neuen Messe Stuttgart, bei der der Firstträger als Raumfachwerkträger mit gläserner Dachkuppel ausgeführt wurde.

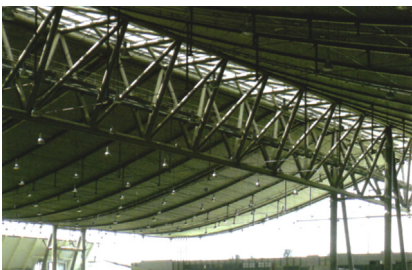
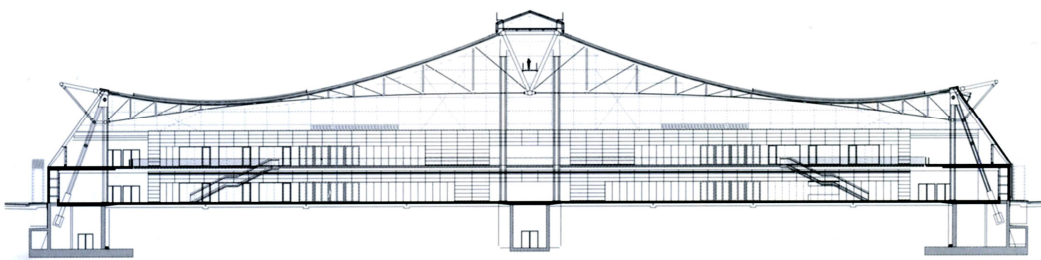


Bild 8-29 Querschnitt durch Halle 1 [Detail 2007], Innenansicht und Außenansicht (mit geöffneten Fenstern) des verglasten Firstträgers, Neue Messe Stuttgart, Architekt: Wulf, Ingenieure: Mayr, Ludescher (BNr. 35)

Bei radialen Hängedächern besteht die entsprechende Belichtungsvariante in der Verglasung des steifen mittleren Zugrings. Alternativ kann dieser zur Aufnahme eines gläsernen Oberlichtkonstruktion genutzt werden (siehe Beispiele in Bild 8-30 und Bild 8-31).

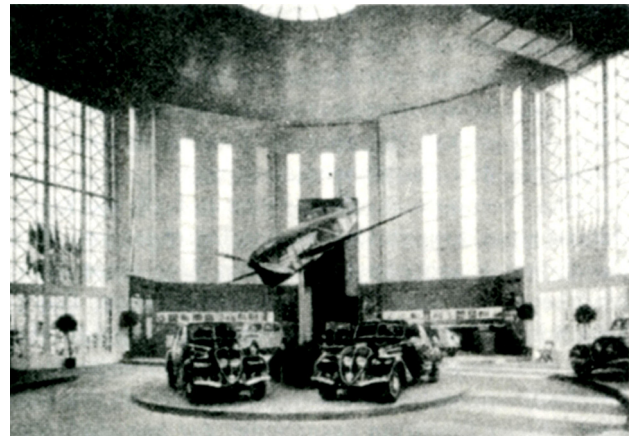
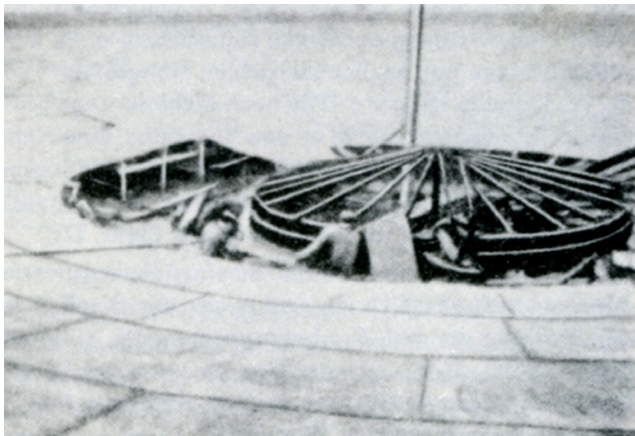


Bild 8-30 Dachfläche mit Laternenkonstruktion im Bauzustand (links), Innenansicht im Endzustand, Französischer Pavillon Zagreb, Architekt: Camelot, Ingenieure: Herbé, Laffaille (BNr. 62) [Otto 1954]

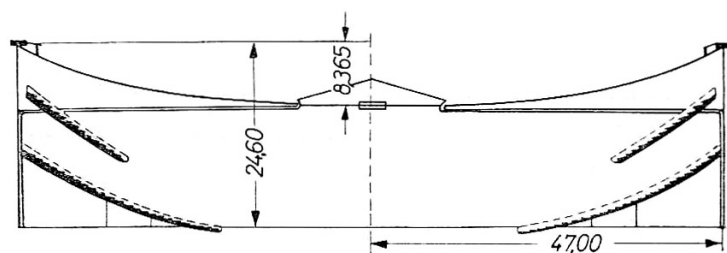
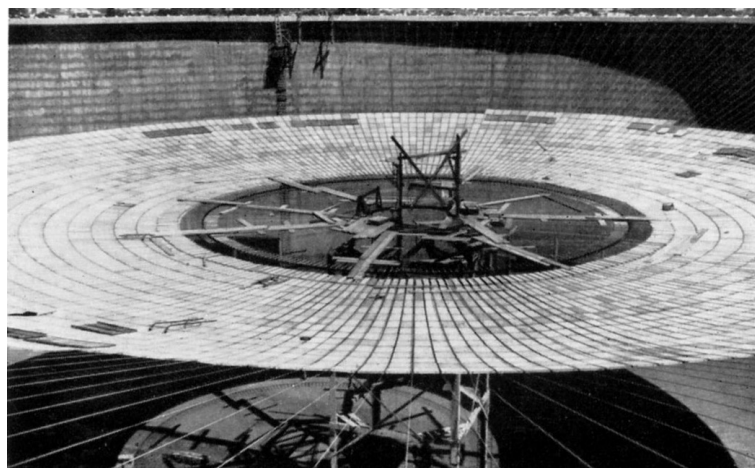


Bild 8-31 Radiales Hängedach im Bauzustand (oben) [Otto 1966], Querschnitt mit verglastem Oberlicht (unten) [Sanchez 1961], Stadion Montevideo, Architekten: Viera, Rios, Mondino, Miller, Ingenieure: Mondino, Voller, Viera (BNr. 88)

Eine wirksame Methode der natürlichen Belichtung besteht in der Eindeckung der gesamten Dachfläche mit Glas- oder transparenten Kunststoffelementen, wobei konstruktionsbedingt jedoch bau-

physikalische Nachteile bezüglich der Wärmedämmung sowie des Blendschutzes auftreten können. Beispiele für unterschiedlich genutzte Bauwerke mit Glas- oder Kunststoffdächern zeigen Bild 8-32 bis Bild 8-35.

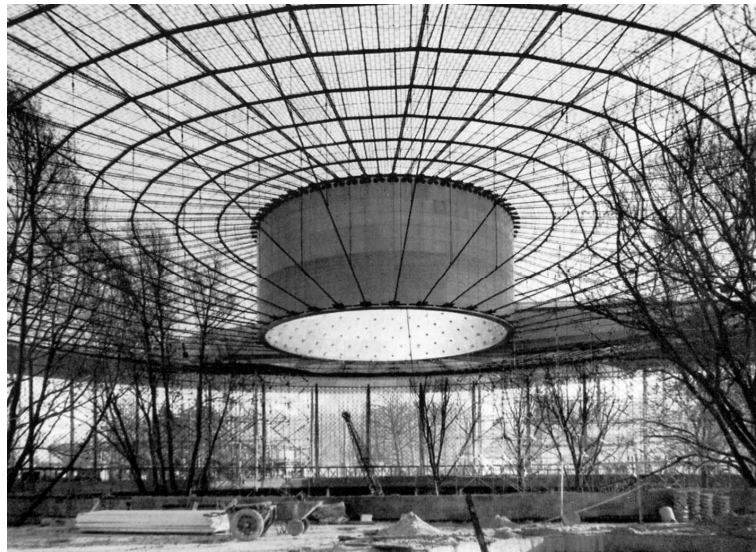


Bild 8-32 Radiales Seilbindersystem mit Dacheindeckung aus halbtransparenten Polyesterplatten, Pavillon der USA auf der Expo 58 in Brüssel, Architekten: Stone, Cornelius, Ingenieure: Stone, Aubert (BNr. 44) [Otto 1966]



Bild 8-33 Hängedach mit Stahlzugbändern und gläserner Dachhaut (VSG), Bahnhofsvordach Ulm, Architekten: Jauss + Gaupp, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 36) [Jauss]



Bild 8-34 Dach mit abgehängten Glasplatten (3 x 10 mm TVG), Bahnsteigüberdachung Heilbronn, Architekten: Auer, Weber und Partner, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 29) [Schlaich 2001]



Bild 8-35 Hängedachbauwerk mit verglasten Dach- und Wandflächen, Römertherme Baden, Architekten: Nemetz, Junger, Weber, Ingenieure: Schlaich, Bergermann und Partner (BNr. 66) [Bögle 2005]

Über die mannigfaltigen Alternativen zur Belichtung des Innenraums hinaus bieten Hängedachkonstruktionen die Möglichkeit, ganzheitliche Konzepte für ein optimiertes Raumklima zu entwickeln. Die konkave Krümmung der Hängedachunterseite gestattet eine natürliche und gleichmäßige Belichtung und Belüftung. Die gekrümmte Unterseite des Hängedachs wirkt dabei wie ein „Großreflektor“, der das einströmende Tageslicht – aber auch Kunstlicht – im ganzen Gebäude streut.

Bei dem Lowara-Bürohaus (siehe Bild 8-36) in Montecchio erlaubt das Hängedach durch eine geschickte Lichtlenkung trotz der Größe des Büroraums annähernd gleiche Belichtungsbedingungen an allen Arbeitsplätzen. Zusätzlich werden die störenden Lärmimmissionen durch die geschwungene Decke gedämpft und an die Raumperipherien geleitet.

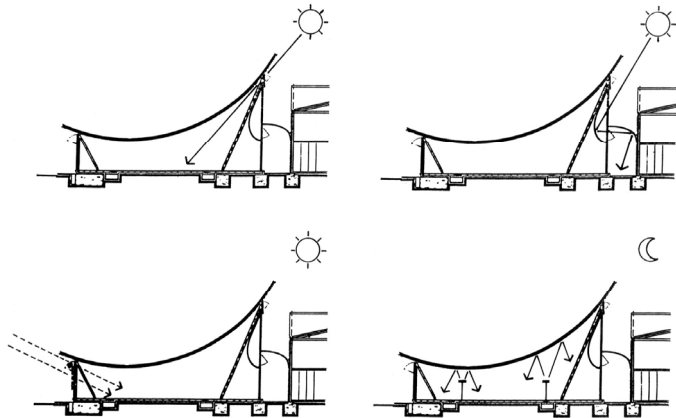
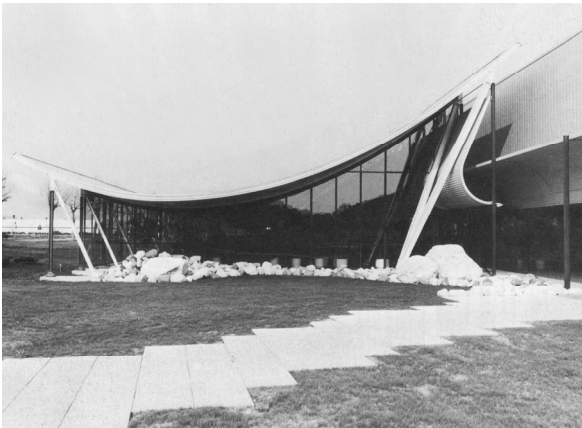


Bild 8-36 Direkte und indirekte Lichteinstrahlung bei Tag und Nacht, natürliche und künstliche Lichtlenkung, Lowara Company Offices in Montecchio Maggiore, Architekt: Renzo Piano, Ingenieure: Favero & Milan (BNr. 61) [Angélil 1987]

Die besondere Dachform mit den konstruktionsbedingten Hochpunkten unterstützt zudem die natürliche Belüftung unter Ausnutzung des thermischen Auftriebs. Dabei steigt die verbrauchte, erwärmte Abluft zum Hochpunkt auf und kann dort über Lüftungsöffnungen abziehen. Gleichzeitig wird Frischluft über weitere Öffnungen in den Fassaden von unten in das Gebäude geleitet. Das gleiche Prinzip wird beim c-Office in Nagoya (Japan) angewendet (Bild 8-37).

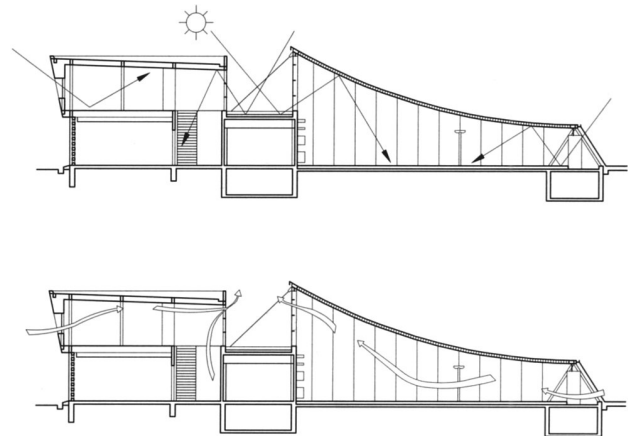


Bild 8-37 Lenkung von Tageslicht (oben) und natürliche Lüftung (unten), c-Office Nagoya, Architekten: FT Architects, Ingenieure: Tada, Otsuka, Okada (BNr. 97) [Cellarius 2004]

Bei der Halle 26 der Messe Hannover sieht der Entwurf eine natürliche Entlüftung an den Hochpunkten unter Nutzung des thermischen Auftriebs vor. Zur gezielten Auslegung der Gebäudetechnik wurden entsprechende Strömungssimulationen durch das Ingenieurbüro HL Technik (München) mithilfe der Software Design Flow Solutions durchgeführt. Das Prinzip der Hallenbe- und -entlüftung ist in Bild 8-38 dargestellt. Durch gläserne Luftkanäle in den Haupterschließungsachsen (Punkt (2) in Bild 8-39) strömt die Zuluft nach unten aus und verteilt sich im gesamten Hallenraum. Die verbrauchte Luft steigt auf und entweicht durch Öffnungen im Firstbereich. Durch einzeln steuerbare Klappen wird erreicht, dass sich je nach vorherrschender Windrichtung nur

Sogkräfte einstellen. Über den Abluftklappen befinden sich zusätzliche Abdeckungen, die die Entlüftung durch den Venturi-Effekt noch verstärken.

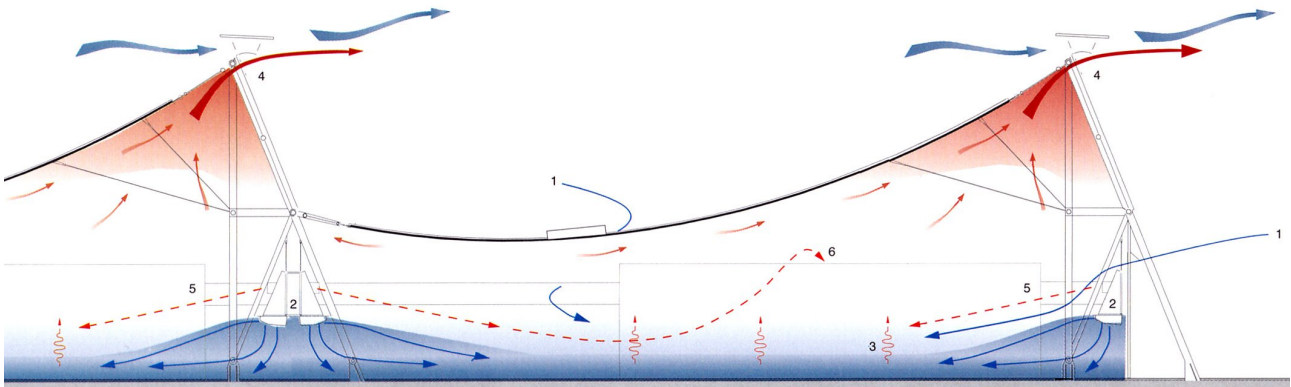


Bild 8-38 Prinzip der Be- und Entlüftung des Innenraums, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

- Kühlfall:**
- 1 natürliche Zuluft über Öffnungen (Klappen) in den Fassaden
 - 2 gläserner Luftkanal mit unterseitigen Quellluftauslässen für gekühlte Luft
 - 3 thermischer Auftrieb durch innere Wärmequellen
 - 4 natürliche Entlüftung über Firstklappen
- Heizfall:**
- 5 mechanische Verteilung erwärmter Zuluft durch Weitwurfdüsen
 - 6 Abluft über seitliche Lüftungszentralen



Bild 8-39 Gläserner Luftkanal mit unterseitigen Quellluftauslässen für gekühlte Luft und mechanische Verteilung erwärmter Zuluft durch Weitwurfdüsen, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

Durch das dargestellte Konzept der natürlichen Hallenbelüftung kann der Einsatz der zusätzlich erforderlichen mechanischen Lüftungsanlagen um etwa 50% verringert werden.

Ebenso wurde bereits im Entwurf die Belichtung der Hallenräume sowohl mit Tageslicht als auch durch künstliche Beleuchtung berücksichtigt. Die Lichtplanung wurde von dem Büro Bartenbach LichtLabor (Österreich) durchgeführt. Tageslicht gelangt über große Verglasungen an der nördlichen Stirnseite (siehe Bild 8-40) sowie über die Oberlichtbänder in den Tiefpunkten in das Gebäude. Durch Licht lenkende Verspiegelungen der Hallendecke wird das einfallende Tageslicht gleich-

mäßig im gesamten Ausstellungsbereich verteilt. Auch für die künstliche Beleuchtung wird der Vorteil der gekrümmten hellen Dachfläche als „Großreflektor“ zur Lichtstreuung genutzt. Bild 8-41 zeigt die Übersicht der Tageslichtführung im Teilschnitt.

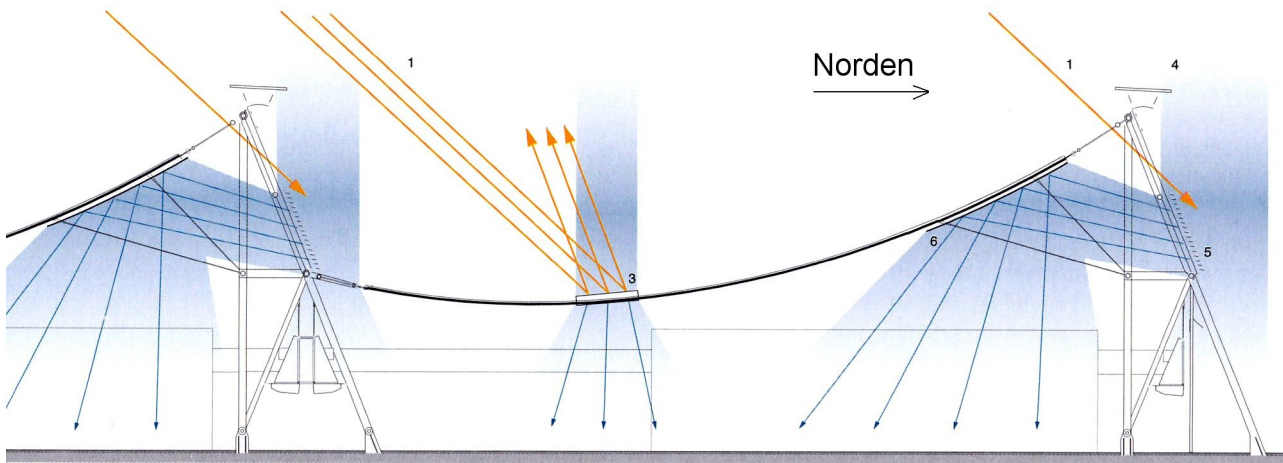


Bild 8-40 Übersicht der Tageslichtführung im Teilschnitt, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

- 1 Direktes Sonnenlicht
- 2 Außen liegender Sonnenschutz (nicht dargestellt)
- 3 Oberlicht mit Isolierverglasung, reflektiertes Sonnenlicht
- 4 Diffuses Tageslicht
- 5 Lamellen zur Lichtumlenkung
- 6 Spiegeldecke

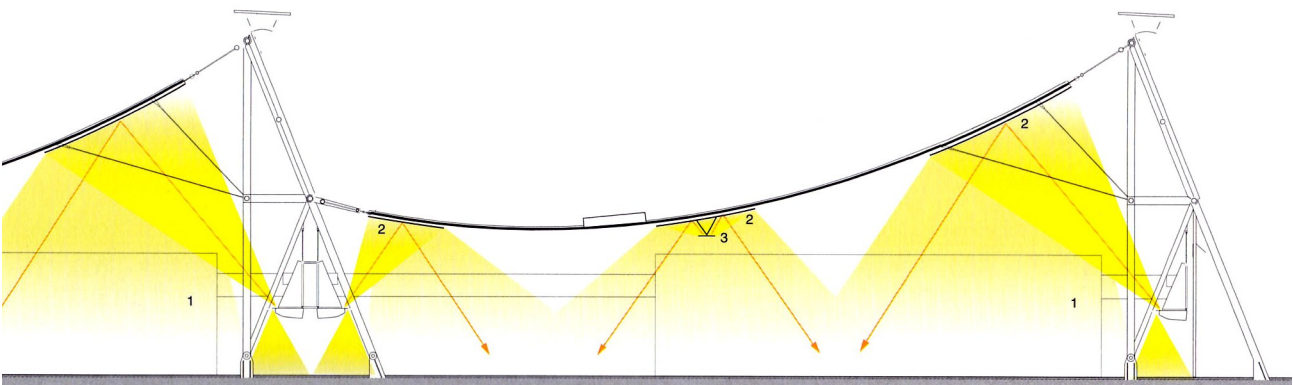


Bild 8-41 Übersicht der künstlichen Beleuchtung im Teilschnitt, Messehalle 26 Hannover, Architekt: Herzog, Ingenieure: Schlaich, Bergemann und Partner (BNr. 10) [Herzog 1996-3]

- 1 Glaskanal mit seitlich angeordneten Leuchten
- 2 Indirekte Beleuchtung über Spiegeldecke
- 3 Abgehängte Leuchtentrasse

Hängedächer bieten hinsichtlich der Belichtung und Belüftung des Gebäudes viele Vorteile gegenüber konventionellen Dächern. Für nähere bauphysikalische Betrachtungen eignen sich spezielle Bauwerksmodelle. An ihnen können Be- und Entlüftungssituationen oder die Lichtlenkung innerhalb des Gebäudes simuliert und untersucht werden.

Computersimulationen ermöglichen heute die Analyse unterschiedlichster Fragestellungen und ersetzen damit zunehmend experimentelle Betrachtungen. Mit Hilfe numerischer Modelle kann ein Bauwerk von der Formfindung über statische und raumklimatische Untersuchungen bis hin zur Werkplanung entwickelt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Hängedächer sind eine Sonderform der leichten Flächentragwerke und werden bevorzugt zur stützenfreien Überdachung mit großen Spannweiten eingesetzt. Sie finden daher häufig Anwendung bei frei stehenden ein- oder mehrschiffigen Hallen sowie Stadien, wobei die Tribünenbereiche vorteilhaft in die Tragkonstruktion integriert werden können.

Die Bauweise der Hängedächer zeichnet sich durch die Art der Lastabtragung aus und bietet eine große Formenvielfalt. Hängedächer sind mindestens in einer Richtung negativ gekrümmte Dachkonstruktionen, bei denen die tragenden Elemente in der Ebene der Dachhaut liegen. Aufgrund definierter Unterscheidungsmerkmale grenzen sich Hängedächer von artverwandten Dachkonstruktionen ab.

Die geschwungene Form sowie die zahlreichen Vorteile der Bauweise bewegen Architekten und Planer bis in die heutige Zeit zum Entwurf von Hängedächern. Hierbei ist jedoch erforderlich, bereits beim Entwurf sämtliche charakteristischen Merkmale zu berücksichtigen und auf Übereinstimmung mit den Nutzungsanforderungen zu überprüfen. Dazu ist die Kenntnis der bauartbedingt komplexen Randbedingungen zwingend erforderlich. Hierzu stehen jedoch bisher nur wenige aktuelle Informationsquellen zur Verfügung.

Folgt aus den Randbedingungen ein nicht akzeptabler konstruktiver oder wirtschaftlich nachteiliger Aufwand, so werden geplante Hängedachkonstruktionen durch geschwungene Dachtragwerke anderer Bauweise ersetzt. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist das Dach der Elbphilharmonie in Hamburg.

Die vorliegende Arbeit enthält eine umfassende Behandlung der Hängedachbauweise, die sich von der Entwicklungsgeschichte über die mechanischen Grundlagen bis hin zu konstruktiven Detaillösungen erstreckt.

Ausgehend von Betrachtungen an Einzelseilen gelingt die Entwicklung einer analytischen Methode zur Formfindung von Hängedachflächen. Auf dieser Grundlage wird ein Formenkatalog entwickelt, der über 50 charakteristische Hängedachformen enthält. Die Analyse dieser Formen ermöglicht eine qualitative Bewertung des Tragverhaltens, der Ausbildung von Hängedachflächen sowie der formbedingten Auswirkungen auf die abzuleitenden Auflagerkräfte.

Aufgrund der kennzeichnenden Merkmale der Hängedächer ergeben sich bauartbedingte Besonderheiten hinsichtlich der Einwirkungen, der Bemessungsgrundsätze und der Ableitung der Horizontalkräfte der Haupttragelemente. Zusätzlich erfordern die Ausbildung der Dachfläche sowie deren Aussteifung und Stabilisierung weitergehende Betrachtungen. Die eigenen Untersuchungen zeigen die für Hängedächer spezifischen Zusammenhänge auf, stellen unterschiedliche Varianten zur Ausführung vor und bewerten diese vor dem Hintergrund möglicher Randbedingungen.

Abschließend erfolgt eine Zusammenstellung typischer Detaillösungen für die Anschlüsse der Zuelemente, auch unter Einbeziehung innovativer Ausführungsmöglichkeiten wie beispielsweise

Zugelementen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Zusätzlich werden Aspekte der Dachentwässerung sowie der Belichtung und Belüftung des überdachten Raums erläutert.

Die im Hauptteil zusammengestellten Grundlagen und erarbeiteten Ergebnisse werden durch eine Übersicht geplanter und ausgeführter Hängedachkonstruktionen im Anhang ergänzt. In Datenblättern sind zu den wesentlichen betrachteten Planungs- und Ausführungsbeispielen hängender Dächer zusätzliche Bauwerksinformationen zusammengestellt.

Die vorliegende Arbeit stellt somit einen umfassenden Beitrag zur Thematik der Hängedächer dar, der sowohl in weiterführenden theoretischen Untersuchungen als auch beim Entwurf und bei der Planung von Hängedächern in der Praxis genutzt werden kann. Die neu entwickelte Methode zur analytischen Formfindung bietet die Möglichkeit, vielfältigste Hängedachformen zu entwerfen und diese zu beschreiben. Die Untersuchungsergebnisse zeigen die Interaktion zwischen der Form des Hängedachs und dem Tragverhalten sowie den bauartbedingten Ausführungen der Dachfläche und der Unterstützungsstrukturen. Die auf Grundlage des Kenntnisstands zur Hängedachbauweise vorgestellte Methode zur Formfindung und die aufgezeigten Abhängigkeiten schaffen damit neue Ansätze zum Entwerfen und Konstruieren von Bauwerken mit Hängedächern.

10 Quellenverzeichnisse

10.1 Literaturverzeichnis

- [AA 1960] NN: „Aéroport International Dulles, Washington“ und „Église de Royan, France“, in: L'Architecture d'aujourd'hui. Panorama 1960, Heft 91-92, 31. Jahrgang, 1960
- [Addis 2007] Addis, Bill: „Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction“, London New York: Phaidon, 2007
- [Altenstadt 1978] von Altenstadt, Ulrich S.: „Eine städtische Mitte für Castrop-Rauxel“, in: Bauwelt, 1978, Band 69, Heft 27/28, S.1042-1049
- [Angélil 1987] Angélil, Marc M.: „Konstruktionen für das Licht. De Menil Kollektion in Texas und das Lowara-Bürohaus in Montecchio“, in: Werk, Bauen und Wohnen 74/41, 1987, Nr. 12, S. 30-39
- [Archplus 1996] N.N.: „Messehalle 26 in Hannover“, in: archplus, 1996, Heft 133, S. 12-13
- [Bauen mit Holz 1997] N.N.: „26.000 m² Dachelemente. Die Halle 26 der Hannover-Messe ist als Stahltragwerk eine Holzbau-Besonderheit“, in: bauen mit holz, 1997, Band 99, Heft 3, S. 26-35
- [Baus 2008] Baus, Ursula; Schlaich, Mike: „Fußgängerbrücken: Konstruktion Gestalt Geschichte“, Basel Boston Berlin: Birkhäuser Verlag, 2008
- [Bauwelt 1953] N.N.: „Das preisgekrönte Hängedach“, in: Bauwelt, 1953, Heft 6, S. 112-113
- [Bauwelt 1954] N.N.: „Der erste deutsche Bau mit hängendem Dach. Die Schwarzwaldhalle in Karlsruhe.“, in: Bauwelt, 1954, Heft 2, S. 26-27
- [Bauwelt 1963] N.: „Hängedach in Oldenburg“, in: Bauwelt, 1963, Heft 37, S. 1065
- [Bauwelt 1974] Z.: „Olympisches Zentrum in Warschau“, in: Bauwelt, 65. Jahrgang, 1974, Heft 35, S. 1195
- [Bauzentrum 1999] N.N.: „Preis des Deutschen Stahlbaues 1998“, in: das bauzentrum, 1999, Band 47, Heft 1, S. 8-12
- [Beer 1963] Beer, H.: „Rundhalle mit Hängekegeldach. Eine bemerkenswerte Neukonstruktion im Hallenbau“, in: Der Stahlbau, 1963, Heft 1, S. 1-10
- [Bergmeister 2003] Bergmeister, Konrad: „Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau“, Berlin: Ernst & Sohn, 2003
- [Boesinger 1986] Boesiger, W.; Girsberger, H.: „Le Corbusier 1910-65“, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Edition Girsberger, 2. Auflage, Zürich: Verlag für Architektur, 1986
- [Bögle 2005] Bögle, Annette u.a. (Hrsg.): „Leicht Weit. Light Structures. Jörg Schlaich Rudolf Bergemann“, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, München Berlin London New York: Prestel Verlag, 2005
- [Böhme 2009] Böhme, W.; Pasternak, H.; Csesznák, A.: „Sanierung einer Schwimmhalle in Potsdam“, in: Bauingenieur, 2009, Band 84, S. 95-100

- [Born 1964] Born, Joachim: „Schalen Faltwerke Rippenkuppeln und Hängedächer, Band 3. Rippenkuppeln Faltwerke Hängedächer“, Düsseldorf: Werner-Verlag, 1964
- [Bouma 1993] Bouma, Adolf Lubbertus: „Mechanik schlanker Tragwerke“, Berlin: Springer-Verlag, 1993
- [Bräuer 1971] Bräuer, Hans Peter: „Untersuchung der statischen Anforderungen, Teilsysteme, Einflussfaktoren und Parameter für den Entwurf von Hängedächern bei besonderer Beachtung der Tragsystems und der Vorbe-messung“, Dissertation an der Fakultät Bau-, Wasser- und Forstwesen, Sektion Architektur, Technische Universität Dresden, 1971
- [Brinkmann 1990] Brinkmann, Günther (Hrsg.): „Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitge-spannter Flächentragwerke“, Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1990
- [Brux 2010] Brux, G.: „Brandschutz für 100000 m²“. in: Brandschutz, 2009, Heft 2, S. 28-29 (auch erschienen als Brux, G.: „Brandschutz für die Hallen der Neuen Messe in Stuttgart“, in: Stahlbau, 2010, 79. Jahrgang, Heft 1, S. 58-60)
- [Burkhardt 2000] Burkhardt, Berthold: „Geschichte des Zeltbaus“, in: Detail, 2000, Heft 6, S. 960-964
- [Burkhardt 2010] Burkhardt, Berthold: „Membran- und Seiltragwerke“, Skript zum Seminar, Institut für Tragwerksplanung, TU Braunschweig, 2010
- [Büttner 1985] Büttner, Oskar; Hampe, Erhard: „Bauwerk, Tragwerk, Tragstruktur“, Berlin: Ernst & Sohn, 1985
- [Cellarius 2004] Cellarius, Christoph: „Verwaltungsgebäude in Nagoya“, in: Detail, 2004, Band 44, Heft 7/8, S. 834 bis 840
- [Dechau 1990] Dechau, Wilfried: „Jumbo. Lufthansa-Wartungshalle in Frankfurt ... in die Jahre gekommen“, in: db, 1990, Band 124, Heft 11, S. 100-106
- [Dechau 2000] Dechau, Wilfried: „Holzband. Hallendach in Hohenems“, in: db, 2000, Band 134, Heft 9, S. 70-77
- [Detail 1987] ABK: „Schule im Hooke Park Dorset, GB“, in: DETAIL, 1987, Band 27, Heft 6, S. 625-628
- [Detail 1990] N.N.: „Tagungszentrum Messe Hannover“, in: DETAIL, 1990, Band 30, Heft 3, S. 275-278
- [Detail 2001] N.N.: „Werkhof in Hohenems“, in: Detail, 2001, Band 41, Heft 5, S. 886-891
- [Detail 2004] N.N.: „Fußballstadion in Braga“ in Detail, 2004, Band 44, Heft 7/8, S. 828-833
- [Detail 2007] N.N.: „Objekt und Produkt. Neue Messe Stuttgart“ in: Detail, 2007, Heft 10, S. 1168 bis 1172
- [Doltsinis 1990] Doltsinis, Ioannis: „Computermethoden der Tragwerksberechnung“, in: Günther Brinkmann (Hrsg.): Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitge-spannter Flächentragwerke, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1990

-
- [Domin 2002] Domin, Christopher; King, Joseph: „Paul Rudolph. The Florida Houses“, New York: Princeton Architectural Press, 2002
- [Drew 1979] Drew, Philip: „Tensile Architecture“, London: Granada Publishing Limited, 1979
- [Drew 2008] Drew, Philip: „New Tent Architecture“, New York: Thames & Hudson, 2008
- [Dürbeck 1933] Dürbeck, A.: „Zeltförmiges Dach aus Stahlblech“, in: Der Stahlbau, 1933, 6. Jahrgang, Heft 19, S. 152
- [EGH 1989] Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) (Hrsg.): „Informationsdienst Holz. Überdachung mit großen Spannweiten“, Arbeitsgemeinschaft Holze.V., Düsseldorf, 1989
- [Ehrensperger 2002] Ehrensperger-Katz, Ingrid; Wick-Werder, Margrit: „Biel Bienne“, Bern: Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte, 2002
- [Eisele 2003] Eisele, Manfred; Bachmann, Hubert: „Umbau der Stadthalle Bremen zum AWD-Dome“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 2003, Band 98, Heft 12, S. 773-780
- [Empelmann 2010] Empelmann, Martin: „Grundlagen des Spannbetonbaus“, Vorlesungsskript Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Massivbau, TU Braunschweig, 2010
- [Engel 1967] Engel, Heinrich: „Tragsysteme“, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1967
- [Eras 1960] Eras, Günter; Elze, Hermann: „Berechnungsverfahren für vorgespannte, doppelt gekrümmte Seilnetzwerke“, Schriftenreihe Ingenieur-theoretische Grundlagen, Berlin :Deutsche Bauakademie, Sektion Naturwissenschaftliche Grundlagen, 1960
- [Ferjenčík 1975] Ferjenčík (Ferenčík), Pavel: „Über ein im Jahr 1826 gebautes Hängedach“, übersetzt von Pertschi, Ottmar, Originalveröffentlichung: (1976) Zborník Vláknové konstrukcie (Cable structures, konstrukcii iz gibkich nitej), Band 1, Bratislava: 1975, S. 130 – 138
- [Ferjenčík 1992] Ferjenčík, P.; Hruban, I.: „Über Leben und Arbeit von Bedřich Schnirch“, in: Bauingenieur, 1992, Band 67, Heft 12, S. 543-554
- [Fleckner 1957] Fleckner, Sigurd: „Das Tragwerk des Daches der Kongresshalle Berlin“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1957, 52. Jahrgang, Heft 9, S. 233-236
- [Flury 2010] Flury, Aita (Hrsg.): „Dialog der Konstrukteure“, Bund Schweizer Architekten BSA, 1. Auflage, Niggli, 2010
- [Fritz 1985] Fritz, Johannes: „Bauen mit frischem Rundholz“, in: Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 31: Bambus Bamboo, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1985
- [Fritz 1993] Fritz, J.: „Ökologisches Bauen mit gekrümmten Rundhölzern“, in: Bauen mit Holz, 1993, Band 95, Heft 2, S. 120-125
- [Gerber 1993] Gerber, Eckhardt: „Das Rathaus Castrop-Rauxel“, in: Der Architekt, 1993, Heft 8, S. 462-465
- [Giefer 1960] Giefer, Alois: „Planen und Bauen im neuen Deutschland“, Bund Deutscher Architekten (Hrsg.), Köln: Westdeutscher Verlag, 1960

- [Graefe 1982] Graefe, Rainer: „Hängedächer“, in: Natürliche Konstruktionen, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1982
- [Graefe 1984] Graefe, Rainer: „Blechzelte. Schinkels Blechzelte und Nachfolgebauten“, in: Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 30: Vela, Toldos, Sonnenzelte, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1984
- [Graefe 1989] Graefe, Rainer: „Hängedächer des 19. Jahrhunderts“, in: Zur Geschichte des Konstruierens, Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1989
- [Graefe 1990-1] Graefe, Rainer: „Virtuose Sparsamkeit. Dachkonstruktionen des russischen Ingenieurs Vladimir G. Šuchov“, in: db, 1990, Band 124, Heft 7, S. 24-31
- [Graefe 1990-2] Graefe, Rainer; Gappoev, Murat; Pertschi, Ottmar: „V.G. Šuchov. 1853-1939, Kunst der Konstruktion“, Institut für Auslandsbeziehungen (Hrsg.), Stuttgart, 1990
- [Greth 1964] Greth, Gino: „Technische und konstruktive Hinweise“ zum Beitrag Klaus-Jakob Thiele: „Konzerthaus des Berliner Philharmonischen Orchesters“, in: Bauwelt, 55. Jahrgang, 1964, Heft 1/2, S. 44 ff.
- [Grüninger 1969] Grüninger, Friedrich; Hirzel, Stephan: „Evangelisches Gemeindezentrum Stuttgart-Sonnenberg“, in: Kunst und Kirche, 32. Jahrgang, Heft 3, Darmstadt: Verlag Das Beispiel, 1969
- [Günschel 1966] Günschel, Günter: „Große Konstrukteure 1: Freyssinet Maillart Dischinger Finsterwalder“, Berlin Frankfurt/M Wien: Verlag Ullstein, 1966
- [Halasz 1996] von Halasz, Robert; Scheer, Claus; Cziesielski, Erich: „Hölzerne Dachflächentragwerke“, in: Holzbau-Taschenbuch, Band 1, 9. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 1996
- [Hartmann 2004] Hartmann Schweizer, Rahel: „Räumliche Komposition schwingt in farbli-chem Dreiklang“, in: tec 21, 2004, Band 130, Heft 7, S. 14-20
- [Henning 1997] Henning, W.: „Die Weltausstellung EXPO 2000 nimmt Gestalt an“, in: Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung. Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostasy, Braunschweig: Selbstverlag, 1997
- [Herzog 1996-1] Herzog, Thomas; Keil, Andreas; Frank, Simon: „Schwungvoll. Spannweite 3 mal 55 m. Messehalle 26 in Hannover“, in: db, 1996, Band 130, Heft 9, S. 52-65
- [Herzog 1996-2] Herzog, Thomas: „Struktur mit hoher Variabilität. „Messehalle 26“ in Han-nover“, in: Deutsche Bauzeitschrift, 1996, Band 44, Heft 10, S. 73-78
- [Herzog 1996-3] Herzog, Thomas (Hrsg.): „Die Halle 26 für die Deutsche Messe AG“, München New York: Prestel Verlag, 1996
- [Herzog 2003] Herzog, Thomas u.a.: „Holzbau Atlas“, Basel München: Birkhäuser, 2003
- [Hetzelt 1957] Hetzelt, Friedrich; Leonhardt, Fritz; Andrä, Wolfhart; Eulitz, H.-J.: „Das Stadtbad Wuppertal“, in: Der Bauingenieur, 1957, 32. Jahrgang, Heft 9, S. 344-359
- [Hossdorf 1975] Hossdorf, Heinz: „Das neue Stadttheater in Basel. Konstruktive Probleme“, in: Bauwelt, 1975, Band 66, Heft 37, S. 1022-1027

-
- [Hübner 2003] Hübner, Björn: „Simultane Analyse von Bauwerk-Wind-Wechselwirkungen“, Dissertationsschrift am Institut für Statik, Technische Universität Braunschweig, 2003
- [Jawerth 1966-1] Jawerth, D.; Schulz, H.: „Ein Beitrag zur Frage der Eigenschwingungen, windanfachenden Kräfte und aerodynamischen Stabilität bei hängenden Dächern“, in: Der Stahlbau, 1966, 35. Jahrgang, Heft 1, S. 1-8
- [Jawerth 1966-2] Jawerth, D.: „Das Eisstadion Stockholm-Johanneshov. Technologie, Statik, Dynamik und Bauausführung“, in: Der Stahlbau, 1966, Heft 3, S. 86-95
- [Kasiske 2009] Kasiske, Michael: „Vom Brauhausberg“, in: Bauwelt, 2009, Heft 44, S. 12-15
- [Kiehn 2006] Kiehn, Diethard; Santina, Ilker; Heiland, Uwe: „Die Messehallen der Neuen Landesmesse Stuttgart“, in: Stahlbau 75, 2006, Heft 10, S. 798-806
- [Kleinmanns 2009] Kleinmanns, Joachim; Weber, Christiane (Hrsg.): „Fritz Leonhardt 1909-1999. Die Kunst des Konstruierens. The Art of Engineering“, Stuttgart London: Edition Axel Menges, 2009
- [Knippers 2010] Knippers, Jan u.a.: „Atlas Kunststoffe + Membranen“, 1. Auflage, München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2010
- [Kollegger 2004] Kollegger, Johann; Bergmeister, Konrad; Gaubinger, Bernhard: „Spannglieder und Vorspannsysteme“, in: Bergmeister, Konrad; Wörner, Johann-Dietrich (Hrsg.): Beton-Kalender 2004, Berlin: Ernst & Sohn, 2004
- [Kostov 1985] Kostov, G.: „Hängedach aus gebogenen Spannbetonplatten“, in: Bauingenieur, 1985, Band 60, Heft 4, S. 131-135
- [Krauss 2000] Krauss; Führer; Willems: „Grundlagen der Tragwerklehre 2“, 5., überarbeitete Auflage, Köln: Rudolf Müller Verlag, 2000
- [Kurz 2007] Kurz, Jörg: „Die Gänsheide. Geschichte und Kultur“, Stuttgart: Verlag im Ziegelhaus, 2007
- [Leicher 2002] Leicher, Gottfried W.: „Tragwerkslehre in Beispielen und Zeichnungen“, 1. Auflage, Düsseldorf: Werner Verlag, 2002
- [LeRoi 1958] LeRoi, Rudolf: „Ingenieurbauten unserer Zeit“, Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (Hrsg.), Wiesbaden Berlin: Bauverlag, 1958
- [Lips 1983] Lips-Ambs, F.J.: „Bauten aus Brettschichtholz in Frankreich, Teil III“, in: Bauen mit Holz, 1983, Band 85, Heft 1, S. 12-13
- [Makowski 1963] Makowski, Z. S.: „Räumliche Tragwerke aus Stahl“, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1963
- [Makowski 1965] Makowski, Z. S.: „Raumtragwerke“, in: Bauwelt, 56. Jahrgang, 1965, Heft 29/30, S. 809
- [Mann 1985] Mann, Walther: „Tragwerkslehre in Anschauungsmodellen“, Stuttgart: Teubner, 1985
- [Mehlhorn 2007] Mehlhorn, Gerhard (Hrsg.): „Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten“, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2007
- [Mehmel 1966] Mehmel, Alfred: „Hochbau“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1966, Heft 12, S. 134-142

- [Meier 1999] Meier, Urs: „Haben kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffkabel für Tragwerke eine Zukunft?“, in: Detail, 1999, Heft 8, S. 1505-1506
- [Merz 2001] Merz, Konrad: „Hängedach mit Einlage. Überdachung des Fahrzeugparks im Werkhof Hohenems“, in: Bauen mit Holz, 2001, Band 103, Heft 2, S. 8-12
- [Misch 1956] Misch: „Freyssinet rettet den Bau eines Rundfunksenders“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1956, 51. Jahrgang, Heft 9, S. 213-214
- [Mislin 1985] Mislin, Miron: „Zur Konstruktionsgeschichte der ersten Hängedächer im 19. Jahrhundert“, in: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Technikgeschichte, Band 52, Heft 1, Düsseldorf: VDI Verlag, 1985
- [Nather 1985] Nather, Friedrich: „Vorgespannte Seilkonstruktionen im Hochbau (Sanierung eines Schadenfalles)“, in: Schneider, Erwin; Nather, Friedrich (Hrsg.): 7. Stahlbauseminar, Band 39, Wissenschaft und Praxis, Veröffentlichung der Fachhochschule Biberach/Riss, 1985
- [Natterer 1969] Natterer, Julius: „Vorgespannte Hängeschalen in Holzrippenbauweise“, in: Bauwelt, 1969, Band 60, Heft 2, S. 50-51
- [Natterer 1993] Natterer, Dittrich: „Netz über dem Wasser. Ein Seilwerk aus Brettschichtholz überspannt das Schwimmbad in Amberg“, in: bauen mit holz, 1993, Band 95, Heft 2, S. 84-87
- [Nerdinger 2005] Nerdinger, Winfried (Hrsg.): „Frei Otto. Das Gesamtwerk“, Basel: Birkhäuser, 2005
- [Neuwirth 1970] Neuwirth, Holger: „Das Kulturhaus – Haus der Jugend in Firminy“, in: Bauforum, 1970, 3. Jahrgang, Heft 20, S. 25-28
- [Otto 1952] Otto, Frei: „Das hängende Dach, ein neues Gestaltungsmittel“, in: Bauwelt, 1952, Heft 40, S. 635-638
- [Otto 1953-1] Otto, Frei: „Das hängende Dach. Die Arena in Raleigh USA“, in: Bauwelt, 1953, Heft 5, S. 89 - 93
- [Otto 1953-2] Otto, Frei: „Die Seilnetze. Weiteres über das hängende Dach“, in: Bauwelt, 1953, Heft 16, S. 302-307
- [Otto 1954] Otto, Frei: „Das hängende Dach“, Berlin: Ullstein-Verlag, 1954
- [Otto 1955] Otto, Frei: „Rheinische Kirchenbauten und hängendes Dach, Architekt: Gottfried Böhm, Köln“, in: Bauwelt, 1955, Heft 51, S. 1047-1050
- [Otto 1956] Otto, Frei: „Neues aus Brasilien“, in: Bauwelt, 1956, Heft 39, S. 915-917
- [Otto 1958] Otto, Frei; Bubner, Ewald: „DBZ-Entwurfsstudie: Hängende Dächer, Zugverankerung im Baugrund“, in: DBZ, 1958, Heft 8, S. 880-884
- [Otto 1966] Otto, Frei: „Zugbeanspruchte Konstruktionen. Band 2“, Berlin: Ullstein Fachverlag, 1966
- [Otto 1970] Otto, Frei: „Gewichtsstabilisiertes leichtes Hängedach“, in: Bauwelt, 1970, Heft 46, S. 1788-1789
- [Otto 1975] Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 8: Netze in Natur und Technik, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1975

-
- [Otto 1978] Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 13: Multihalle Mannheim, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1978
- [Otto 1984] Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 30: Vela, Toldos, Sonnenzelte, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1984
- [Otto 1985] Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 31: Bambus Bamboo, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1985
- [Otto 1988] Otto, Frei (Hrsg.): Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, IL 18: Seifenblasen, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1988
- [Otto 1995] Otto, Frei; Rasch, Bodo: „Gestalt finden“, Deutscher Werkbund Bayern, Edition Axel Menges, 1995
- [Pałkowski 1990] Pałkowski, Szymon: „Statik der Seilkonstruktionen“, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990
- [Papst 1959] Papst, Paul: „Das Hängedach des Stadtbades zu Neunkirchen-Saar“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1959, 54. Jahrgang, Heft 3
- [Peil 2000] Peil, Udo: „Bauen mit Seilen“, in: Ulrike Kuhlmann (Hrsg.): Stahlbau Kalender, Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2000
- [Pelkonen 2006] Pelkonen, Eeva-Liisa; Albrecht, Donald: „Eero Saarinen. Shaping the Future“, New Haven London: Yale University Press, 2006
- [Picon 1997] Picon, Antoine (Hrsg.): „L’Art de l’ingénieur“, Paris: Éditions du Centre Pompidou, 1997
- [Pizzi 2003] Pizzi, Emilio: „Renzo Piano“, Basel: Birkhäuser, 2003
- [Plagemann 2007] Plagemann, Volker; Syring, Eberhard (Hrsg.): „Architektur einer Hafenstadt. Carsten Schröck“, Katalog zur Ausstellung des Bremer Zentrum für Baukultur, Schriftenreihe Band 8, Delmenhorst: Aschenbeck & Holstein Verlag, 2007
- [Postulka 1979] Postulka, Josef: „Seildächer des Theaters in Győr“, in: Weitgespannte Flächentragwerke. 2. Internationales Symposium, Sonderforschungsbereich 64, 2. Berichtsheft, Stuttgart, 1979
- [Pran 1970] Pran, Peter: „Ausstellungshalle mit Hängedach“, in: Bauwelt, 1970, Heft 11, S. 414-415
- [Probst 1960] Probst, Raimund: „Rationeller Industriebau und Stahlbeton im Industriebau. Referate auf dem IV. Hessischen Bautag und der Kurztagung“, in: Bauwelt, 1960, 51. Jahrgang, Heft 16, S. 431 ff.
- [Quade 1969] Quade, Jochen: „Zur Statik und Konstruktion des Hängedaches der Sportschwimmhalle Dresden“, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig, 1969, Heft 2, S. 95-101
- [Quade 2009] Quade, Jochen; Wojan, Immanuel; Dehn, Frank: „Belastungsversuche an einer Schwimmhalle mit vorgespanntem Seilhängedach in Dresden“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 2009, 104. Jahrgang, Heft 9, S. 609-615

- [Rabinovič 1966] Rabinovič, I. M.: „Hängedächer“, Wiesbaden Berlin: Bauverlag, 1966
- [Raiß 1962] Raiß, W.: „Baustelle Berlin: Die Philharmonie“, in: Bauwelt, 53. Jahrgang, 1962, Heft 37, S. 1033 ff.
- [Rickenstorf 1982] Rickenstorf, Günther; Berndt, Eberhard: „Tragwerke für Hochbauten“, 2. Auflage, Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1982
- [Roland 1965] Roland, Conrad: „Frei Otto – Spannweiten“, Berlin: Verlag Ullstein, 1965
- [Román 2002] Román, Antonio: „Eero Saarinen, An Architecture of Multiplicity“, London: Princeton Architectural Press, 2002
- [Rosemeier 1998] Rosemeier, Gustav-Erich: „Zur Ermittlung verformungsabhängiger Windlasten bei leichten Flächentragwerken“, in: Bautechnik, 1998, Band 75, Heft 6, S. 381-390
- [Rühle 1970] Rühle, Herrmann: „Räumliche Dachtragwerke. Konstruktion und Ausführung. Band 2“, Köln-Braunsfeld: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1970
- [Saarinen 2005] Saarinen, Eero; Merkel, Jayne: „Eero Saarinen“, London: Phaidon Press, 2005
- [Saber 1997] Saberi-Haghighi, Kamran: „Zur Ermittlung der verformungsabhängigen Windbelastung bei Hängedächern“, Bericht Nr. 53/1997, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 1997
- [Sanchez 1961] Sanchez-Arcas, M.: „Form und Bauweise der Schalen“, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1961
- [Sandaker 1994] Sandaker, Bjørn Normann; Eggen, Arne Petter: „Die konstruktiven Prinzipien der Architektur“, Basel Berlin Boston: Birkhäuser, 1994
- [Sandaker 2008] Sandaker, Bjørn Normann: „On Span and Space“, London: Routledge, 2008
- [Schlaich 2001] Schlaich, Mike; Golenhofen, Dominik: „Das hängende Dach vor dem Hauptbahnhof Heilbronn“, in: Stahlbau, 2001, Band 70, Heft 11, S. 821-826
- [Schlaich 2007] Schlaich, Mike; Bleicher, Achim: „Spannbandbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen“, in: Bautechnik, 2007, 84. Jahrgang, Heft 5, S. 311-319
- [Schmidt 1974] Schmidt, Albert: „Sporthalle St. Jakob in Basel“, in: Schweizerische Bauzeitung, 1974, 92. Jahrgang, Heft 51/52
- [Schmidt 2003] Schmidt, Hartwig; Pichler, Gerhard: „Die Bremer Stadthalle“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 2003, Band 98, Heft 12, S. 773-780
- [Schneider 1968] Schneider, Horst H.: „Die neue Madison Square Garden Arena“, in: Der Stahlbau, 1968, Heft 5, S. 155-159
- [Schnetzer 2006] Schnetzer, Heinrich; Andresen, Kurt; Eitel, Mark: „Elbphilharmonie Hamburg. Grundsätzliche Überlegungen zur Zusammenarbeit Ingenieur – Architekt“ in: Bautechnik, 2006, 83. Jahrgang, Heft 3, S. 157-166
- [Schober 2003] Schober, Hans; Gegeler, Jochen: „Verglastes Hängedach für die Römertherme in Baden bei Wien“, in: Stahlbau, 2003, Band 72, Heft 1, S. 21-28

-
- [Schröter 1972] Schröter, H.-J.: „Die olympische Basketballhalle in München mit Kegelschalenhängedach“, in: Der Stahlbau, 1972, Heft 8, S.249-250
- [Schulitz 1989] Schulitz, Helmut C.u.a.: „Flugzeughallen Hangars“, Schriftenreihe des Instituts für Baukonstruktionen und Industriebau der TU Braunschweig – Prof. Dipl.-Ing. Helmut C. Schulitz (Hrsg.), Band 1, Berlin: Quadrato-Verlag, 1989
- [Schunck 2002] Schunck, Eberhard u.a.: „Dach Atlas. Geneigte Dächer“, 4. Auflage, München: Birkhäuser, 2002
- [Schwabe 1959] Schwabe, Amtor; Saechtling, Hansjürgen: „Bauen mit Kunststoffen“, Berlin: Ullstein Fachverlag, 1959
- [Schwarz 1990] Schwarz, Günter: „Wind und Bauwerk“, in: Günther Brinkmann (Hrsg.): Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1990
- [Scott 1965] Scott, Jack L.; O'Malley, Kenneth K.; Gulley, Harvey G.: „Suspended Catenary Cable Roof of Oklahoma State Fair Arena“, in: Journal of the American Concrete Institut, April 1965, S. 385-402
- [Siegel 1960] Siegel, Curt: „Strukturformen der modernen Architektur“, München: Verlag Callwey, 1960
- [Smith 1968] Smith, Bradley: „Spanien. Geschichte und Kunst“, München Zürich: Droemer Knaur, 1968
- [Speich 1988] Speich, M.; Hinkes, F.-J.: „Rahmen und Hängerippen bilden das Dach“, in: Bauen mit Holz, 1988, Band 90, Heft 3, S. 144-146
- [Stauske 1990] Stauske, Dieter: „Herstellung und Montage von Seilbauwerken“, in: Klaus Feyrer (Hrsg.): Stehende Drahtseile und Seilendverbindungen, Ehningen bei Böblingen: Expert Verlag, 1990
- [Stock 2005] Stock, Wolfgang Jean: „Eduardo Souto de Moura. Fußballstadion in Braga“, in: Bauen in Beton, Ausgabe 2004/05, S. 56-60
- [Streit 1986] Streit, W.: „Neues Wahrzeichen für afrikanische Stadt“, in: Bauingenieur, 1986, Band 61, Heft 5, S. 204
- [Szafer 1988] Szafer, T. Przemysław: „Współczesna architektura polska“, Warschau: Arkady, 1988
- [Thon 1970] Thon, Rudolf; Bomhard, Helmut: „Konstruktion und Bau der Wartungshalle V auf dem Flughafen Frankfurt/Main“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1970, Heft 5, S. 121-132
- [Tsuboi 1964] Tsuboi, Yoshikatsu; Kawaguchi, Mamuro: „Zur Olympiade in Tokio: Zwei Sporthallen“, in: Bauwelt, 1964, Heft 42, S. 1119-1123
- [Tsuboi 1966] Tsuboi, Y.; Kawaguchi, M.: „Probleme beim Entwurf einer Hängedachkonstruktion anhand des Beispiels der Schwimmhalle für die Olympischen Spiele 1964 in Tokio“, in: Der Stahlbau, 1966, 35. Jahrgang, Heft 3, S. 65-85
- [Ummenhofer 2011] Ummenhofer, Thomas; Misiek, Thomas; Kathage, Karsten: „Zugstäbe und ihre Anschlüsse“, in: Stahlbau Kalender, Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2011, S. 461-502

- [Vaessen 1959] Vaessen, Franz: „Das Hängedach der großen Trainings- und Ausstellungshalle der Westfalenhalle AG. in Dortmund“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1959, 54. Jahrgang, Heft 10, S. 233-240
- [Voigt 2006] Voigt, Wolfgang: „Gottfried Böhm“, Berlin: Jovis Verlag, 2006
- [Wagner 1987] Wagner, Rosemarie; Egermann, Ralph: „Die ersten Drahtkabelbrücken“, Sonderforschungsbereich 64, Weitgespannte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, Düsseldorf: Werner-Verlag, 1987
- [Wagner 2007] Wagner, Rosemarie: „Bauen mit Seilen und Membranen“, in: Stahlbau, 2007, 76. Jahrgang, Heft 5, S. 279-280
- [Weiss 2011] Weiss, Klaus Dieter: „Wettkampfstätte und Freizeitbad. Sanierung der Schwimmbader in Wuppertal“, in: Metamorphose, 2011, Heft 03, S. 44-47
- [Werk 1997] Red.: „Messehalle in Hannover, 1997“, in: Werk, Bauen + Wohnen, 1997, Nr. 9, S. 13-17
- [Westerhoff 1992] Westerhoff, Dieter: „Offene Spiralseile. Vollverschlossene Spiralseile“, Produktinformation der Thyssen Draht AG, Hamm Gelsenkirchen, 1992
- [Wettbewerbe 2007] N.N.: „Neue Messe Stuttgart“, in: wettbewerbe aktuell, 2007, Heft 9, S. 87-92
- [Weyres 1957] Weyres, Willy: „Neue Kirchen im Erzbistum Köln 1945-1956“, Düsseldorf: Verlag Schwann, 1957
- [Winkler 2000] Winkler, Olaf: „In die Jahre gekommen. Stadthalle Bremen, 1957-64“, in: db, 2000, Band 134, Heft 9, S. 110-116
- [Wittfoht 1966] Wittfoht, Hans: „Spannbeton-Kongress Paris 1966. Arbeitssitzung VII. Bemerkenswerte Bauwerke. Hochbau“, in: Beton- und Stahlbetonbau, 1966, Heft 12, S. 302-310
- [Wörner 1991] Wörner, Martin; Lupfer, Gilbert: „Stuttgart. Ein Architekturführer“, 1. Auflage, Berlin: Dietrich Reimer Verlag, 1991
- [Zachwatowicz 1966] Zachwatowicz, Jan: „Architektura Polska“, Warschau: Arkady, 1966

10.2 Weitere Quellen

- [Andresen 2011] Dr.-Ing. K. Andresen, Gesellschafter Rohwer Ingenieure VBI GmbH, Europastrasse 33, 24976 Handewitt (Jarplund), Telefonat vom 11. August 2011
- [Bruemmer 2009] Bruce H. Bruemmer, Director, Corporate Archives / 70, Cargill, Incorporated, Minneapolis, USA, e-Mail Korrespondenz, September 2009
- [Graefe 2010] Rainer Graefe, Professor für Baugeschichte am Institut für Architekturtheorie und Baugeschichte der Universität Innsbruck, e-Mail Korrespondenz vom 20.06.2010
- [Löschhorn 2011] Bettina Löschhorn, Mitarbeiterin im Architekturbüro Wulf & Partner, Charlottenstraße 29/31, 70182 Stuttgart, Telefonat vom 11. April 2011
- [Schnetzer 2011] Dr. sc. techn. H. Schnetzer, Geschäftsleiter WGG Schnetzer Puskas Ingenieure AG, Güterstrasse 144, Basel, Schweiz, Telefonat vom 12. August 2011

[Google Earth] Google Earth
Stand: 24.09.2009

Internet-Quellen:

allgemein: www.wikipedia.org
 <http://de.structurae.de>

[BauNetz] Homepage BauNetz
Meldungen: Musik unter dem Hängedach
www.baunetz.de
Stand: 22.04.2011

[Binder] Homepage der Firma Binder + Co
Unternehmen: Geschichte
www.binder-co.com/de/unternehmen/geschichte.php
Stand: 03.05.2010

[Campusführer] Historischer Campusführer der Universität Stuttgart, Abteilung Geschichte
der Naturwissenschaften und Technik am Historischen Institut
Objekt N: Institut für Leichte Flächentragwerke
www.uni-stuttgart.de/hi/gnt
Stand: 02.03.2010

[Dresden] Das neue Dresden
Schwimm- und Sprunghalle Freiburger Platz
www.das-neue-dresden.de
Stand: 26.12.2009

[Expo 67] Homepage der Expo 67 in Montreal
Sowjetischer Pavillon
www.expo67.ncf.ca
Stand 27.06.2008

[FT Architects] Homepage des Büros FT Architects
c-Office
www.fta.gotohp.jp
Stand: 22.09.2009

[Jauss] Homepage des Architekturbüros Jauss + Gaupp
Vordach Hauptbahnhof Ulm
www.architekten-jauss-gaupp.de
Stand 13.11.2008

[Karlsruhe] Stadtwiki Karlsruhe
Schwarzwaldhalle
<http://ka.stadtwiki.net/Schwarzwaldhalle>
Stand: 01.10.2009

[Lowara] Homepage der ITT-Lowara
Unternehmen: Das Renzo Piano Gebäude
www.lowara.com/company/renzopiano.php
Stand: 25.02.2010

- [Memotransfront] Memotransfront Uni Saarland
Stätten grenzüberschreitender Erinnerung (Europe 1)
www.memotransfront.uni-saarland.de
Stand: 29.09.2009
- [Messe Stuttgart] Homepage der Messe Stuttgart
Messegelände Halle 3-9 und Impressionen
www.messe-stuttgart.de
Stand: 01.09.2008 und 14.04.2012
- [Montevideo] Offizielle Webseite von Montevideo
Meldungen: Intendencia analiza futuro del Cilindro
www.montevideo.gub.uy/noticias/intendencia-analiza-futuro-del-cilindro
Stand: 27.04.2011
- [Pittsburgh] Homepage Visit Pittsburgh
Convention Center
www.visitpittsburgh.com
Stand: 22.09.2009
- [Potsdam] Homepage der Stadtwerke Potsdam, Bäderlandschaft Potsdam GmbH
Historie: Geschichte vom Bad Am Brauhausberg
www.swp-potsdam.de/swp/de/baeder/home-blp.php
Stand: 12.08.2008
- [Powerhouse] Homepage des Fachgebiets Entwerfen und Energieeffizientes Bauen der
TU Darmstadt,
Powerhouse (Mercedes Forum)
www4.architektur.tu-darmstadt.de
Stand 04.12.2007
- [Schlaich] Homepage des Ingenieurbüros Schlaich, Bergermann und Partner
Messe Hannover Halle 8/9
www.sbp.de/de
Stand: 10.03.2009
- [St. Jakobshalle] Homepage St. Jakobshalle Basel
Service: Geschichte
www.stjakobshalle.ch/geschichte.asp
Stand: 23.09.2009
- [Structurae] Homepage Structurae
Sowjetischer Pavillon
www.structurae.de
Stand 10.10.2008
- [Uruguay] El Pais Viajes
Uruguay: Si se quisiera reconstruir el Cilindro Municipal
www.viajes.elpais.com.uy
Stand: 30.07.2011
- [WTG] Homepage Windtechnologische Gesellschaft e.V.
Der natürliche Wind, Windeffekte
www.wtg-dach.org
Stand: 21.07.2010

10.3 Abbildungsverzeichnis

- Bild 2-1 Aufbau einer einseitig negativ gekrümmten Dachfläche eines Hängedachs, eigenes Bild
- Bild 2-2 Hängefläche zwischen parallelen, gradlinigen Auflagern, eigenes Bild
- Bild 2-3 Hängefläche innerhalb eines Kreisrings, eigenes Bild
- Bild 2-4 Lastabtrag bei rechteckigem Grundriss und parallelen Auflagerlinien, eigenes Bild
- Bild 2-5 Lastabtrag bei kreisrundem Grundriss, eigenes Bild
- Bild 2-6 Verformung der Zuelemente eines Hängedachs unter Einzellasten, eigenes Bild
- Bild 2-7 Seil-Trägernetz, aus: [Otto 1954], S. 121
- Bild 2-8 Verteilung von Einzellasten bei Seil-Trägernetzen, aus: [Siegel 1960], S. 280
- Bild 2-9 Verformung eines Hängedachs unter in Längsrichtung antimetrischer Windlast, eigenes Bild
- Bild 2-10 Gefahr des Durchstülpens bei Windangriff in Querrichtung, aus: [Otto 1954], S. 128
- Bild 2-11 Spannstahldach zwischen massiven Endbauwerken (offenes System), Ausschnitt aus: [Rickenstorf 1982], S. 227
- Bild 2-12 Vergleichende Gegenüberstellung Hängedach und Seilbinder-Dach, aus: [Rühle 1970], S. 16-17
- Bild 2-13 Prinzip der Verspannung durch gegensinnig gekrümmte Spannseile, aus: [Krauss 2000], S. 94
- Bild 2-14 Seilbinder, Spreizbinder, gemischte Konstruktion, aus: [Leicher 2002], S. 189-190
- Bild 2-15 „Jawerth-Träger“, aus: [Krauss 2000], S. 189
- Bild 2-16 Möglichkeiten der Spreizung bei radialen Systemen, Ausschnitt aus: [Rabinovič 1966], Abb. 12
- Bild 2-17 Entgegengesetzt gekrümmte Trag- und Spannseile, aus: [Krauss 2000], S. 95
- Bild 2-18 Konstruktionsformen für zweisecharige, doppelt gekrümmte Seiltragwerke, Ausschnitt aus: [Rühle 1970], S.20
- Bild 2-19 Begrenzung mit Randseilen, aus: [Bräuer 1971], Abb. 15 und [Büttner 1985], S. 270
- Bild 2-20 Seilnetzkonstruktionen mit Randbogen und mit geraden Randträgern, bearbeiteter Ausschnitt aus: [Büttner 1985], S. 150
- Bild 2-21 Seilnetzkonstruktionen mit Mast und Augenseil und mit Bogen als Zwischenstützung und Randbogen, aus: [Rickenstorf 1982], S. 231 und [Makowski 1963], Bild 220d
- Bild 2-22 Membrankonstruktion mit Mitteldruckbogen, Entwurf: Frei Otto, aus: [Siegel 1960], S. 298
- Bild 2-23 Membrankonstruktion mit Grat- und Kehlseilen, Entwurf: Frei Otto, aus: [Siegel 1960], S. 298
- Bild 2-24 Beispiele für frei hängende Membranen, Gemälde „Fronleichnamspzession in Sevilla“ von Manuel Cabral, aus: [Smith 1968], Eingangsaldachin, Burg Bled, (Slowenien), 2009, Foto: Berthold Burkhardt

- Bild 2-25 Beispiele für frei hängende Membranen,
links: Markise am Kanzlerbungalow, Bonn, 1964, Foto: Berthold Burkhardt, 2009
rechts: Markise in Terracina (Italien), 1795, aus: [Graefe 1982], S. 62
- Bild 2-26 Abgehängtes Dach der Papierfabrik in Mantua, Ingenieur: Pier Luigi Nervi,
aus: [Krauss 2000], S. 90
- Bild 2-27 Abgehängte Dächer, Abhängung von Mittelpylonen, von Tragseilen, von Seitenpylonen,
aus: [Rickenstorff 1982], S. 232
- Bild 3-1 Entwurf eines Theaters mit Hängedach aus Eisenketten, 1824, Ingenieur: Friedrich Schnirch, aus: [Graefe 1989], S. 169
- Bild 3-2 Wohnhaus mit Hängedach in Banská Bystrica (Neusohl) (BNr. 68),
aus: [Ferjenčík 1992], S. 550, Bild 17
- Bild 3-3 Konstruktionszeichnungen des Wohnhauses mit Hängedach in Banská Bystrica (Neusohl) (BNr. 68) sowie eines weiteren Wohnhauses in Banská Bystrica,
aus: [Ferjenčík 1992], S. 550, Bild 2a und 2b
- Bild 3-4 Drahtseilbrücke bei Bry-sur-Marne, aus: [Mislin 1985], S. 28
- Bild 3-5 Fertigungshalle im Seehafen von Lorient (BNr. 47), aus: [Mislin 1985], S. 31
- Bild 3-6 Rotunde des Panorama auf den Champs Élysées in Paris (BNr. 49),
aus: [Mislin 1985], S. 34
- Bild 3-7 Konstruktionsblatt mit Darstellung des Hängewerks des Panorama,
aus: [Mislin 1985], S. 35
- Bild 3-8 Halle des Sängerbundfestes in Dresden (BNr. 23), aus: [Mislin 1985], S. 40
- Bild 3-9 Tragkonstruktion der Halle des Sängerbundfestes in Dresden (BNr. 23),
Ausschnitt aus: [Mislin 1985], S. 38
- Bild 3-10 Entwürfe von Lehaitre und Mondésir für hängende Dächer,
Ausschnitt aus: [Mislin 1985], S. 41
- Bild 3-11 Flugzeughalle in Cherbourg (BNr. 42), aus: [Mislin 1985], S. 43
- Bild 3-12 Hangar im Hafen von Bizerta (BNr. 90), aus: [Mislin 1985], S. 44
- Bild 3-13 Bau der Rotunde (BNr. 92), Ausschnitt aus: [Graefe 1990-2], S. 33
- Bild 3-14 Dachkonstruktion der Rotunde im Bauzustand; innerer Ringträger auf Stützen,
aus: [Graefe 1990-2], S. 33
- Bild 3-15 Rechteckiger Ausstellungspavillon (BNr. 93), Außenansicht,
Ausschnitt aus: [Graefe 1990-2], S. 34
- Bild 3-16 Rechteckiger Ausstellungspavillon, Innenraum; Firstgitterträger auf Stützenreihe,
aus: [Graefe 1990-2], S. 34
- Bild 3-17 Ovaler Ausstellungspavillon (BNr. 94), Längsansicht,
Ausschnitt aus: [Graefe 1990-2], S. 36
- Bild 3-18 Ovaler Ausstellungspavillon, Innenraum während des Eindeckens des Daches;
unterspannter Fachwerk-Firstbalken auf zwei Gitterstützen,
aus: [Graefe 1990-2], S. 38

- Bild 3-19 Getreidelagerhalle Albany (BNr. 73), Ansicht einer der vier Dachflächen, aus: [Otto 1954], S. 23
- Bild 3-20 Französischer Pavillon Zagreb (BNr. 62), aus: [Picon 1997], S. 551
- Bild 3-21 Querschnitt durch den Französischen Pavillon Zagreb (BNr. 62), Ausschnitt aus [Otto 1954], S. 25
- Bild 3-22 Eisstadion Hovet (BNr. 71), Ausschnitt aus: [Jawerth 1966-2], Bild 25
- Bild 3-23 Querschnitt durch die Konstruktion des Eisstadions Hovet (BNr. 71) mit Jawerth-Träger, aus: [Jawerth 1966-2], Bild 1
- Bild 3-24 Schwarzwaldhalle Karlsruhe (im Bauzustand) (BNr. 30), aus: [Otto 1954], S. 141
- Bild 3-25 Schwarzwaldhalle Karlsruhe (BNr. 30), Schematische Darstellung der Dachkonstruktion und Deckenuntersicht, aus: [Otto 1954], S. 141
- Bild 3-26 Schwarzwaldhalle Karlsruhe (BNr. 30), Innenraum, aus: [Addis 2007], Abb. 578
- Bild 3-27 Schwimmoper Wuppertal (BNr. 20), Außenansicht, aus: [Rabinovič 1966], Abb. 4a
- Bild 3-28 Längsschnitt durch die Schwimmoper Wuppertal (BNr. 20) mit Zuschauertribünen, aus: [Rabinovič 1966], Abb. 4a
- Bild 3-29 St. Paulus Kirche Velbert (BNr. 19), aus: [Weyres 1957]
- Bild 3-30 Blick in den Altarraum der St. Paulus Kirche Velbert (BNr. 19) mit fehlender Dachausfachung, Ausschnitt aus: [Weyres 1957]
- Bild 3-31 Portugiesischer Pavillon (BNr. 55), Ausschnitt aus: [Drew 2008], S. 50
- Bild 3-32 Portugiesischer Pavillon (BNr. 55), Auflagerrand mit frei liegenden Spannseilen, Ausschnitt aus: [Sandaker 2008], S. 51
- Bild 3-33 Fußballstadion Braga (BNr. 54), aus: [Drew 2008], S. 57
- Bild 3-34 Lowara Company Offices in Montecchio Maggiore (BNr. 61), Ausschnitt aus: [Pizzi 2003], S. 124
- Bild 3-35 Querschnitt durch den Büroraum mit Belichtungskonzept, gespiegelter Ausschnitt aus: [Pizzi 2003], S. 125
- Bild 3-36 Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), Ausschnitt aus: [Bauzentrum 1999], S. 8
- Bild 3-37 Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), große Halle 1 mit anschließender Halle 3, Ausschnitt aus: [Wettbewerbe 2007], S. 88
- Bild 3-38 Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), Dachaufsicht auf Halle 6, aus: [Messe Stuttgart]
- Bild 3-39 Werkhof Hohenems (BNr. 60), aus: [Merz 2001], S. 8
- Bild 3-40 Werkhof Hohenems (BNr. 60), Dachuntersicht, aus: [Merz 2001], S. 8
- Bild 3-41 Bahnhofsvordach Ulm (BNr. 36), aus: [Jauss]
-
- Bild 4-1 Durchhang f , Spannweite L und Seillänge L_s , eigenes Bild
- Bild 4-2 Verteilung des Eigengewichts eines Seils mit verformter Seilgeometrie, eigenes Bild
- Bild 4-3 Seil mit horizontaler Sehne unter Eigengewicht, eigenes Bild
- Bild 4-4 Seil mit kartesischem Koordinatensystem, Translationen T_x , T_y und T_z , eigenes Bild

- Bild 4-5 Seil mit kartesischem Koordinatensystem, Rotationen R_x , R_y und R_z , eigenes Bild
- Bild 4-6 Zusammenhang zwischen Durchhang, Spannweite und Seillänge, eigenes Bild
- Bild 4-7 Auflagerverschiebung am Seil mit Änderung des Durchhangs, eigenes Bild
- Bild 4-8 Zusammenhang zwischen Änderung der Spannweite und Änderung des Durchhangs bei verschiedenen Verhältnissen von Seillänge zu Spannweite, eigenes Bild
- Bild 4-9 Hängemodell zum Studium von gewichtsstabilisierten Hängedächern, aus: [Otto 1995], S. 62
- Bild 4-10 Hängemodelle zum Studium der Form asiatischer Dächer, aus: [Otto 1995], S. 128
- Bild 4-11 Kettenmodell mit unterschiedlich hohen geradlinigen Rändern, eigenes Foto
- Bild 4-12 Dachform mit zunehmendem Durchhang zu einer Längsseite, eigenes Foto und Bild
- Bild 4-13 Dachform mit zunehmendem Durchhang zu beiden Längsseiten, eigenes Foto und Bild
- Bild 4-14 Rotation des Einzelseils um die y-Achse, eigenes Bild
- Bild 4-15 Translationsform mit parallelen, unterschiedlich hohen Auflagerlinien, eigenes Bild
- Bild 4-16 Rotationsfigur mit liegendem Randbogen, eigenes Bild
- Bild 4-17 Trapezförmiger Grundriss mit aufgefächelter Zuggliedanordnung, eigenes Bild
- Bild 4-18 Seilnetz aus rechtwinklig angeordneten Seilscharen über ungleichförmigem Grundriss, eigenes Bild
- Bild 4-19 Ungleichförmiger Grundriss mit variierenden Seillängen und Durchhängen, eigenes Bild
- Bild 4-20 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit höhengleichen Auflagern, eigenes Bild
- Bild 4-21 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit unterschiedlich hohen Auflagern, eigenes Bild
- Bild 4-22 Auflagerkräfte am hängenden Seil mit unterschiedlich hohen Auflagern und horizontaler Seiltangente am tieferen Auflager, eigenes Bild
- Bild 4-23 Zusammenhang zwischen Auflagerkräften A_V und A_H sowie Last q , Spannweite L , Durchhang f bzw. Höhenunterschied der Auflager h , eigenes Bild
- Bild 4-24 Zusammenhang zwischen Spannweite und Auflagerkräften bei konstantem Durchhang, eigenes Bild
- Bild 4-25 Zusammenhang zwischen Durchhang und Auflagerkräften bei konstanter Spannweite, eigenes Bild
- Bild 4-26 Kräftegleichgewicht am Auflagerpunkt bei großer und geringer Seilneigung ρ , eigenes Bild
- Bild 4-27 Translationsfläche mit identischen Auflagerkräften der Zugelemente, eigenes Bild
- Bild 4-28 Einseitig gekrümmte Fläche mit horizontaler Unterkante, eigenes Bild
- Bild 4-29 Einseitig gekrümmte Fläche mit geneigter Unterkante bei geneigten Auflagerlinien, eigenes Bild
- Bild 4-30 Einseitig gekrümmte Fläche mit geneigter Unterkante bei veränderlichem Durchhang, eigenes Bild
- Bild 4-31 Radial gekrümmte Form mit horizontaler Tiefpunktanordnung, eigenes Bild
- Bild 4-32 Rotationsfläche über ovalem Grundriss mit zwei Tiefpunkten, eigenes Bild

- Bild 4-33 Form mit doppelt negativer Krümmung bei durchhängenden Auflagerlinien, eigenes Bild
- Bild 4-34 Form mit doppelt negativer Krümmung bei veränderlichem Durchhang, eigenes Bild
- Bild 4-35 Form mit doppelt negativer Krümmung bei umlaufend gehaltenem Rand, eigenes Bild
- Bild 4-36 Figur mit Gegenkrümmung durch veränderliche Seillängen, eigenes Bild
- Bild 4-37 Figur mit Gegenkrümmung durch Verlauf der Auflagerlinien, eigenes Bild
- Bild 4-38 Freie Grundrissform mit unregelmäßigen Durchhängen und mit zur Mitte zunehmenden Durchhängen, eigenes Bild
- Bild 4-39 Reine Translationsform ohne Querneigung, eigenes Bild
- Bild 4-40 Translationsfläche mit einer horizontalen und einer nach vorne geneigten Auflagerlinie, eigenes Bild
- Bild 4-41 Symmetrische Rotationsfigur mit Ringmulde, eigenes Bild
- Bild 4-42 Unsymmetrische Rotationsfigur mit einem Tiefpunkt, eigenes Bild
- Bild 4-43 Rotationsfigur mit Tiefpunkten am äußeren Auflagerrand, eigenes Bild
- Bild 4-44 Entwässerung in Längsrichtung bei ausreichend großem Gefälle, eigenes Bild
- Bild 4-45 Fläche zwischen zwei Randseilen mit Mulde in Dachmitte, eigenes Bild
- Bild 4-46 Stark geneigte Form mit Tiefpunkt am Rand, eigenes Bild
- Bild 4-47 Entwässerung zu den freien Längsrändern bei gegensinniger Krümmung der Fläche, eigenes Bild
- Bild 4-48 Figur über unregelmäßigem Grundriss mit zwei Tiefpunkten im Inneren, eigenes Bild
- Bild 4-49 Spannweiten der Dacheindeckung, eigenes Bild
- Bild 4-50 Schnitt durch eine zusammengesetzte Hängefläche mit Zwischenunterstützung, eigenes Bild
- Bild 4-51 Auflagerkräfte an Rand- und Mittelauflagern, eigenes Bild
- Bild 4-52 Addition von Einzelflächen zu einer Gesamtfigur, eigenes Bild
- Bild 4-53 Zusammenhang zwischen Spannweite und Seillänge bei konstantem Durchhang, eigenes Bild
- Bild 4-54 Zusammenhang zwischen Seillänge und Durchhang bei konstanter Spannweite, eigenes Bild
- Bild 4-55 Zusammenhang zwischen Spannweite und Durchhang bei konstanter Seillänge, eigenes Bild
- Bild 4-56 Zusammenhang zwischen Last und Durchhang bei elastischem Materialverhalten, eigenes Bild
- Bild 4-57 Seile mit unterschiedlichen Auflagerhöhen bei gleichen Spannweiten, eigenes Bild
- Bild 4-58 Ausgangsform A: Isometrien und Längsansicht, eigenes Bild
- Bild 4-59 Modifikation A1: Isometrien und Längsansicht, eigenes Bild
- Bild 4-60 Modifikation A2: Isometrien und Längsansicht, eigenes Bild
- Bild 4-61 Ausgangsform B: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie, eigenes Bild

- Bild 4-62 Modifikation B1: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie, eigenes Bild
- Bild 4-63 Modifikation B2: Draufsicht mit Quer- und Längsansicht und Isometrie, eigenes Bild
- Bild 4-64 Ausgangsform C: Draufsicht, Isometrie und Queransicht, eigenes Bild
- Bild 4-65 Modifikation C1: Draufsicht, Isometrie und Queransicht, eigenes Bild
- Bild 4-66 Modifikation C2: Draufsicht, Isometrie und Queransicht, eigenes Bild
-
- Bild 5-1 Lastbild einer ungleichmäßigen Belastung aus Schnee mit zugehöriger Verformungsfigur in Dachlängsrichtung, eigenes Bild
- Bild 5-2 Verteilung von Eigengewicht g und Schneelast s mit möglicher resultierender Gesamtlast p in Längsrichtung eines Hängedachs, Ausschnitt aus: [Büttner 1985], S. 326
- Bild 5-3 Verteilung der Windsogbeiwerte für parabolische Hängedächer nach Babajeva, aus: [Quade 1969], Bild 15
- Bild 5-4 Verschiedene Durchschlagphasen eines Hängedachs unter Windlast von links, aus: [Saber 1997], Abb. 5.8
- Bild 5-5 Verteilung der Windlasten bei einem nach oben durchgeschlagenen Dach, Ausschnitt aus: [Rosemeier 1998], Bild 20
- Bild 5-6 Verteilung der Winddruckbeiwerte über die Dachfläche, 1. Sporthalle Yoyogi (BNr. 98), aus: [Tsuboi 1966], Bild 24
- Bild 5-7 Verlauf der rechtwinklig zum Dach angreifenden Windkräfte, aus: [Hetzelt 1957], Abb. 2
- Bild 5-8 Elbphilharmonie Hamburg, aus: [Schnetzer 2006], S. 157, Bild 1
- Bild 5-9 Windkanalversuche am Modell der Westfalenhalle 4 in Dortmund (BNr. 16), aus: [Vaessen 1959], Bild 8.1
- Bild 5-10 Darstellung der Versuchsergebnisse, aus: [Vaessen 1959], Bild 8.3
- Bild 5-11 Modell 1:30 aus Beton und Drahtseilen, aus: [Tsuboi 1966], Bild 12
- Bild 5-12 Skizze eines Teilmodells aus Aluminium-Bleichen, aus: [Tsuboi 1966], Bild 25
- Bild 5-13 Modell der aufgefädelten Holzelemente und Arbeitsmodell zur Ermittlung der optimalen Biegelinie, aus: [FT Architects]
- Bild 5-14 Diskretisierung eines Hängedachs durch Seilelemente zur rechnerischen Ermittlung der Windlasten, aus: [Rosemeier 1998], Bild 18
- Bild 5-15 Zusammenhang zwischen Durchhang, horizontalen Auflagerkräften und Höhe der Auflager, eigenes Bild
- Bild 5-16 Schnitt durch den Längsrand des Hängedachs, Dach und Rinnenträger sind baulich getrennt, Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16), aus: [Vaessen 1959], Bild 9
- Bild 5-17 Randverankerungssysteme, offenes System und geschlossenes System, eigenes Bild
- Bild 5-18 Verankerung eines Tragseils mit Abspannseil und Anordnung des Druckpfostens in der Winkelhalbierenden, eigenes Bild
- Bild 5-19 Kräfteverlauf bei vertikalem Druckpfosten mit flacher und steiler Ausbildung der Abspannung, eigenes Bild

- Bild 5-20 Fachwerkbock mit dreieckförmigem Gegengewicht, Lufthansa-Wartungshalle Frankfurt (BNr. 24), Ausschnitt aus: [Büttner 1985], S. 433
- Bild 5-21 Lastableitung über Bockkonstruktionen, Ausschnitt aus: [Rabinovič 1966], Abb. 5
- Bild 5-22 Lastableitung über Wandscheiben, aus: [Leicher 2002], S. 195
- Bild 5-23 Konstruktion mit Seilbindern, in der Dachfläche liegenden Randfachwerkträgern und Wandscheiben, Reparaturhalle für Omnibusse Berlin-Weißensee (BNr. 6), aus: [Büttner 1985], S. 277
- Bild 5-24 Zusätzliche Nutzung der Abspannkonstruktion als Unterkonstruktion für Tribünen einer Sport- und Festhalle, Entwurf: Frei Otto, aus: [Otto 1954], S. 138
- Bild 5-25 Ableitung der Seilkräfte, eigenes Bild
- Bild 5-26 Möglichkeiten der Ausbildung von Randträgern, eigenes Bild
- Bild 5-27 Hängedach mit Randseil und Eckabspannungen, aus: [Leicher 2002], S. 195
- Bild 5-28 Wandscheiben als kombinierte Widerlager- und Tribünauflegerkonstruktionen, Fußballstadion Braga (BNr. 54), Ausschnitt aus: [Detail 2004], S. 828
- Bild 5-29 Hängedach mit schrägen Pfeilern zur Ableitung der Dachlasten, Terminal Dulles International Airport (BNr. 78), aus: [Saarinen 2005], S. 222
- Bild 5-30 Querschnitt durch das Hängedach mit anschließenden Gebäuden, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), aus: [Merz 2001], Bild 4 (ergänzte Beschriftung)
- Bild 5-31 Querschnitt durch das Gebäude, Saalbau-Hallenbad Biel (BNr. 58), Ausschnitt aus: [Hartmann 2004], Bild 4
- Bild 5-32 Hängedach über kreisrundem Grundriss mit innerem Zugring und mit Innenstütze, Ausschnitt aus: [Rabinovič 1966], Abb. 17
- Bild 5-33 Geschlossenes kreisrundes System mit äußerem Druckring und inneren Zugring im Bauzustand, Villita Assembly Building (BNr. 84), aus: [Makowski 1965], Bild 215
- Bild 5-34 Kräfteverlauf bei geschlossenem Randverankerungssystem mit Rechteckgrundriss, aus: [Rabinovič 1966], Abb. 5
- Bild 5-35 Kräfteverlauf in einem geschlossenen Randverankerungssystem über rechteckigem Grundriss mit gekrümmtem Druckbalken, aus: [Siegel 1960], S. 281
- Bild 5-36 Geschlossenes Randverankerungssystem über rechteckigem Grundriss, Neubau der Technischen Oberschule für Energetik Sofia (BNr. 63), aus: [Kostov 1985], S. 134
- Bild 5-37 Geschlossenes Randverankerungssystem: freie Stirnseiten, Fassadenstützen entlang der Längsseiten, aus: [Otto 1954], S. 124
- Bild 5-38 Auswirkungen einer Zwischenunterstützung, eigenes Bild
- Bild 5-39 Hängedach mit Rahmen als Mittelunterstützung, Lufthansa-Wartungshalle (BNr. 24), aus: [Dechau 1990], S. 101
- Bild 5-40 Hängedach mit Mittelunterstützung durch Firstbalken und Stützböcke, Kirche Heilig-Geist (BNr. 18), aus: [Voigt 2006], S. 95 und [Born 1964], S. 70
- Bild 5-41 Fundamentplatte als Druckbalken zwischen den Außenfundamenten, aus: [Sandaker 1994], S. 184
- Bild 5-42 Schema des konstruktiven Systems, 1. Sporthalle Yoyogi (BNr. 98), aus: [Tsuboi 1966], Bild 5

- Bild 5-43 Schwergewichtsverankerung mit einzeln angehängten Wasser- oder Sandsäcken, aus: [Otto 1958], S. 880
- Bild 5-44 Aufliegender Betonkörper in Quaderform und mit verzahnter Unterseite, aus: [Otto 1958], S. 880
- Bild 5-45 Eingegrabener Betonwinkel, aus: [Otto 1958], S. 880
- Bild 5-46 Verankerung der Zugkräfte aus dem Hängedach, Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16), aus: [Vaessen 1959], Bild 3
- Bild 5-47 Längsschnitt mit Gründungssituation, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Bauen mit Holz 1997], Bild 2
- Bild 5-48 Verankerungen für große Zugkräfte, aus: [Otto 1954], S. 75-76 (überarbeitete Beschriftung)
- Bild 5-49 Verankerungen für untergeordnete und temporäre Konstruktionen, aus: [Otto 1954], S. 76 und [Otto 1958], S. 882
- Bild 5-50 Übertragung der Zugkräfte vom Pfahl auf den Baugrund, aus: [Leicher 2002], S. 194
-
- Bild 6-1 Blechdach vor der Hauptwache auf dem Schlossplatz in Detmold (BNr. 14), aus: [Graefe 1984], Bild 27
- Bild 6-2 Blechdach einer Getreidelagerhalle in Albany (BNr. 73) während der Montage der Dachbahnen, aus: [Otto 1954], S. 23
- Bild 6-3 Anschließen der Furnierschichtholzbahnen, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), Ausschnitt aus: [Merz 2001], Bild 15
- Bild 6-4 Montage der Dacheindeckung auf den Flachstahlbändern, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3], S. 44
- Bild 6-5 Eisenketten gemäß eines Entwurfs für ein Theater mit eisernem Hängedach (1824), Ingenieur: Friedrich Schnirch, aus: [Graefe 1989], S. 168
- Bild 6-6 Dachuntersicht mit Eisenketten-Zugelementen, Wohnhaus in Banská Bystrica (Neusohl) (BNr. 68), in: [Ferjenčík 1992], S. 552, Bild 19
- Bild 6-7 Querschnitte hochfester Zugglieder, aus: [Peil 2000], S. 698
- Bild 6-8 Hängedach mit Stahlseilen im Bauzustand, Maison de la Culture Firminy (BNr. 53), aus: Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig
- Bild 6-9 Draufsicht auf die Stahlseile ohne und mit Eindeckung, Fußballstadion Braga (BNr. 54), Ausschnitt aus: [Detail 2004], S. 832
- Bild 6-10 Einstabspannglieder aus geripptem und glattem Spannstahl, aus: [Kollegger 2004], S. 227
- Bild 6-11 Spanndrahtlitze mit Verankerungskeil, aus: [Kollegger 2004], S. 224
- Bild 6-12 Dachfläche während des Eindeckens, Sporthalle Augsburg (BNr. 37), aus: Bild-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig
- Bild 6-13 Montage der Stahlhängebänder 60 x 40 mm aus Baustahl S 355, Römertherme Baden (BNr. 66), aus: [Schober 2003], S. 28
- Bild 6-14 Flachstahlbänder 40 x 60 mm mit Glaseindeckung, Bahnhofsvordach Ulm (BNr. 36), aus: [Bögle 2005], S. 175

- Bild 6-15 Verwendung von Firstseil und Rundhölzern als Hängezugbänder, Hooke Park College (BNr. 40), Ausschnitt aus: [Otto 1985], S. 371
- Bild 6-16 Holzrippen mit Bretterschalung, Dach für die Bundesgartenschau Dortmund (1969) (BNr. 17), aus: [Halasz 1996], Bild 79
- Bild 6-17 Maschinelle Produktion von Glasfasern, aus: [Knippers 2010], S. 76
- Bild 6-18 Versuchs-Spannbandbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen und Belastungstests, aus: [Schlaich 2007], S. 318, Bild 17 und 18
- Bild 6-19 Einheben der Dachbahnen, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), aus: [Merz 2001], Bild 14
- Bild 6-20 Querschnitt durch ein Dachelement; aus: [Merz 2001], Bild 10
- Bild 6-21 Einsatz von Fertigteilelementen bei der Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Bauen mit Holz 1997], Bild 4 und 11
- Bild 6-22 Verlegen der hölzernen Hohlkastenelemente auf den Stahlzugbändern, aus: [Herzog 1996-3], S. 45
- Bild 6-23 Auffädeln der BSH-Elemente auf die Spannlitzen, Anheben und Vorspannen der Dachbahnen, c-Office Nagoya (BNr. 97), Ausschnitte aus: [Cellarius 2004], S. 840
- Bild 6-24 Querschnitt durch die Dachkonstruktion, Westfalenhalle 4, Dortmund (BNr. 16), aus: [Vaessen 1959], Bild 2.1
- Bild 6-25 Verlegen der Fertigteil-Rippen auf Gerüst und Schalung, Ausschnitt aus: [Vaessen 1959], Bild 16.2
- Bild 6-26 Verlegen der Bimsplatten auf den Rippen, aus: [Vaessen 1959], Bild 17
- Bild 6-27 Deckenuntersicht, eigenes Foto, Dortmund, Juni 2010
- Bild 6-28 Einbau der Bewehrung und der Spannstähe auf Gerüst und Schalung, Schwimmoper Wuppertal (BNr. 20), aus: [Born 1964], S. 51
- Bild 6-29 Betonieren der Dachbahnen am Boden, Neubau der Technischen Oberschule für Energetik Sofia (BNr. 63), aus: [Kostov 1985], S. 133, Bild 5
- Bild 6-30 Anheben der Dachbahnen, aus: [Kostov 1985], S. 133, Bild 6
- Bild 6-31 Eingehängte Bahnen, Ausschnitt aus: [Kostov 1985], S. 134, Bild 8
- Bild 6-32 Einhängen eines vorbereiteten Blechstreifens und Verschweißen der Dachbahnen, Getreidelagerhalle Albany (BNr. 73), aus: [Otto 1954], S. 23
- Bild 6-33 Anschluss der Profilblech-Eindeckung an Seilkonstruktionen, aus: [Rühle 1970], S. 54
- Bild 6-34 Vorspannen einer Hängedachfläche mit Spannpressen, Ausschnitt aus: [Otto 1954], S. 131
- Bild 6-35 Vorspannen von Zuggliedern mittels hydraulischer Spannpressen gegen die Verankerungsränder, aus: [Rühle 1970], S. 57
- Bild 6-36 Vorspannen einer Dachfläche durch Abspannen, Ausschnitt aus: [Otto 1954], S. 131
- Bild 6-37 Vorwegnahme der Verformungen im Endzustand für Montage der Dacheindeckung, Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), aus: [Detail 2007], S. 1169 und aus: Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig

- Bild 6-38 Verformungsanfälligkeit des Hängedachs bei abhebenden Einwirkungen und Schwingungen sowie veränderlichen Einzellasten, aus: [Engel 1967], S.29
- Bild 6-39 Ausbildung einer schweren Dachhaut, aus: [Leicher 2002], S. 189
- Bild 6-40 Portugiesischer Pavillon (BNr. 55) mit Schwergewichtshängedach, aus: [Flury 2010], S. 96
- Bild 6-41 Überlagerung von großem Eigengewicht und Windsog mit Darstellung des verformten Systems, eigenes Bild
- Bild 6-42 Ausführung von Dachflächen mit Stabilisierungsgewichten, eigenes Bild
- Bild 6-43 Rudi-Sedlmayer-Halle (BNr. 38) mit mittigem Stabilisierungsgewicht von 100 t, aus: [Schröter 1972], Bild 1
- Bild 6-44 Stabilisierung der Tragseile durch Auflast ohne Vorspannung (Seiltragwirkung) und durch Auflast und Vorspannung (Schalentragwirkung), aus: [Büttner 1985], S. 431
- Bild 6-45 Sporthalle Augsburg (BNr. 37), Ansicht des teilweise montierten Dachs, aus: Bild-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig
- Bild 6-46 Stabilisierung der Dachhaut mit Abspannseilen („guy wire“) in schwach gekrümmten Bereichen, halber Längsschnitt, Raleigh-Arena (BNr. 79), aus: [Otto 1954], S. 90
- Bild 6-47 Vertikale Längsseitenabspannung, eigenes Bild
- Bild 6-48 Seil-Trägernetz mit Abspannung der Querträger an ihren Enden, aus: [Siegel 1960], S. 280
- Bild 6-49 Kirche Heilig-Geist (BNr. 18) mit Abspannungen an den verglasten Längsseiten, aus: [Voigt 2006], S. 95
- Bild 6-50 Abspannung der freien Ränder, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), aus: [Detail 2001], S. 891
- Bild 6-51 Vorgespannte Fassadenpfosten und Abspannung des Dachs gegen die Auflagerböcke, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3], S. 48
- Bild 6-52 Tragverhalten eines gegengespannten Zugelements, Ausschnitt aus: [Engel 1967], S. 31
- Bild 6-53 Stabilisierung der freien Längsseiten eines Hängedachs mit Gegenspannseilen, aus: [Otto 1954], S. 128
- Bild 6-54 Unterspannung der Tragseile im Bereich der Auflagerböcke, Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), aus: [Wettbewerbe 2007], S. 89
-
- Bild 7-1 Seil-Endverbindungen für offene und vollverschlossene Spiralseile, aus: [Westerhoff 1992], S. 53
- Bild 7-2 Madison Square Garden Arena (BNr. 75), Fertiges Stahlseil mit geschmiedetem Gabelendstück und Innerer Zugring mit Augenblechen, aus: [Schneider 1968], Bild 5 und 6
- Bild 7-3 Verbindungen mit Pressklemmen, aus: [Westerhoff 1992], S. 53
- Bild 7-4 Beispiel für eine Seil-Endverbindung mit Drahtseilklemmen, aus: [Peil 2000], S. 706
- Bild 7-5 c-Office Nagoya (BNr. 97), Verspannung der BSH-Elemente gegen ein Stahlprofil und Anschlussdetail Zugelemente-Stützen-Abspannung, Ausschnitte aus: [Cellarius 2004], S. 840 und 838

- Bild 7-6 Spannschloss zur Justierung der Seillänge und Gabelspannschloss, aus: [Knippers 2010], S. 198 und [Stauske 1990], S. 80
- Bild 7-7 Anschluss der Gegenspannseile am Auflagerbock mit Gabelspannschlössern, Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), eigenes Foto, Stuttgart, September 2008
- Bild 7-8 Anschluss des Tragseils an den Betonrand über Gewindemuffe, Spannschloss und Augenstab, Raleigh-Arena (BNr. 79), Ausschnitt aus: [Otto 1953-1], S. 90
- Bild 7-9 Verbindung von Seilenden mit Verbindungsflasche und Nierenplatte, aus: [Leicher 2002], S. 197
- Bild 7-10 Spannanker, aus: [Empelmann 2010], Bild 8a, 8b und 8c
- Bild 7-11 Festanker, aus: [Empelmann 2010], Bild 9a und 9b
- Bild 7-12 Verankerung der Spannseile eines gegensinnig gekrümmten Dachs mit Fest- und Spannanker, Knapsack-Feierabendhaus Hürth (BNr. 21), Ausschnitt aus: [Born 1964], S. 58
- Bild 7-13 Sportschwimmhalle Dresden (BNr. 22), Seilverankerung mit Ankerplatte in einer Aussparung im Randträger und Übergang Randträger – Dachfläche, aus: [Rickenstorf 1982], S. 234
- Bild 7-14 Verformbarer Anschluss des Daches an die Randträger, Westfalahalle 4 Dortmund (BNr. 16), aus: [Vaessen 1959], Bild 7.21 und 7.22
- Bild 7-15 Anschluss des Flachstahl-Zugelements an den Knoten des Fachwerk-Randträgers, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3], S. 41
- Bild 7-16 Gelenkiger Anschluss des Doppel-T-Hauptzugelements am Kopf des Auflagerbocks mit Gabelende und Bolzenverbindung, Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), eigenes Foto, Stuttgart, September 2008
- Bild 7-17 Verankerungsdetail des Hängebands, Römertherme Baden (BNr. 66), aus: [Schober 2003], S. 26 und 25
- Bild 7-18 Druckring mit einbetoniertem Anschlussblech und Darstellung eines Dachsektors, Rundhalle Gleisdorf (BNr. 65), aus: [Beer 1963], Bild 11
- Bild 7-19 Untersicht Elementstoß mit Anschlussblechen, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), Ausschnitt aus: [Detail 2001], S. 889 und 890
- Bild 7-20 Anschluss Hängerippe an Rahmenriegel, Fertigungspavillons Bad Münster-Eimbeckhausen (BNr. 13), Foto-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig, Exkursion Bad Münster, Mai 2009 und [Speich 1988], S. 146, Bild 4
- Bild 7-21 Verankerungsklemme zur Verankerung eines Kohlenstofffaser-Drahts, aus: [Bergmeister 2003], Bild 2.29
- Bild 7-22 „Dehnungs-Klemm-Anker“ für Kohlenstofffaserlamellen, aus: [Schlaich 2007], S. 315, Bild 7
- Bild 7-23 Zylindrische und konische Verankerungsmanschette für Kohlenstofffaserdrähte, aus: [Bergmeister 2003], Bild 2.30 und 2.32
- Bild 7-24 Konische Verankerungen für Kohlenstofffaserdrähte mit Rippen und Abstufungen, aus: [Bergmeister 2003], Bild 2.34
- Bild 7-25 Keilverankerung („Composite wedge system“) für Kohlenstofffaserdrähte, aus: [Schlaich 2007], S. 315, Bild 8
- Bild 7-26 „Strangschlaufe“ für Kohlenstofffaserlamellen, aus: [Schlaich 2007], S. 316, Bild 9

- Bild 8-1 Hängedächer mit großem Dachlängsgefälle, c-Office Nagoya (BNr. 97) und Forum Europaplatz Castrop-Rauxel (BNr. 15), aus: [Cellarius 2004], S. 835 sowie eigenes Foto, Castrop-Rauxel, Juni 2009 und eigene Skizzen
- Bild 8-2 Hängedach mit Ausbildung eines Gefälles durch unterschiedlich Längen der Zug-elemente, Sportschwimmhalle Dresden (BNr. 22), aus: [Quade 1969], Bild 1 und eigene Fotos, Dresden, Dez. 2008
- Bild 8-3 Hängedach mit Ausbildung eines Gefälles durch veränderliche Höhen der Auflager-linien, Westfalenhalle 4 Dortmund (BNr. 16)
Luftbild, aus: [Otto 1966], S. 25
Querschnitt und Längsschnitt, aus: [Vaessen 1959], Bild 1.1 und 1.2
Fallrohre im Tiefpunkt der Längsseite, eigenes Foto, Dortmund, Juni 2010
- Bild 8-4 Hängedach mit Dachflächenentwässerung über Quergefälle zu Wasserspeier an den Längsseiten, Maison de la Culture Firminy (BNr. 53), aus: Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig und aus: [Boesinger 1986], S. 160
- Bild 8-5 Hängedach mit Dachflächenentwässerung über Quergefälle zu Fallrohr am Längsrand, Bahnhofsvordach Ulm (BNr. 36), aus: [Bögle 2005], S. 174-175
- Bild 8-6 Entwässerung vom Innenring über drei angehängte Rinnen nach außen, Französischer Pavillon Zagreb (BNr. 62), aus: [Otto 1954], S. 25 (überarbeitete Beschriftung)
- Bild 8-7 Entwässerung des Blechhängedachs, Rotunde Allrussische Ausstellung (BNr. 92), aus: [Picon 1997], S. 335
- Bild 8-8 Fenster- und Türöffnungen bei einem Wohnhaus in Banská Bystrica (BNr. 68), aus: [Ferjenčík 1992], S. 550
- Bild 8-9 Stirnseite mit Toren und hoch angeordneten Fenstern, Getreidelagerhalle Albany (BNr. 73), aus: [Otto 1954], S. 23
- Bild 8-10 Massive Außenwände mit hohen, schlanken Fenstern, Französischer Pavillon Zagreb (BNr. 62), aus: [Picon 1997], S. 551
- Bild 8-11 Stirnseite mit Tür und Fenstern, St. Paulus Kirche Velbert (BNr. 19), aus: [Weyres 1957], Bild 122
- Bild 8-12 Vollverglasung der Längsseiten, Teilverglasung der Stirnseiten, c-Office Nagoya (BNr. 97), aus: [FT Architects]
- Bild 8-13 Umlaufende Fassadenverglasung, Terminal Dulles International Airport (BNr. 78), aus: [Saarinen 2005], S. 229
- Bild 8-14 Umlaufende Fassadenverglasung bei gegenläufig gekrümmtem Dach, Raleigh-Arena (BNr. 79), Ausschnitt aus: [Picon 1997], S. 398
- Bild 8-15 Umlaufende Verglasung bei kreisrundem Hängedach, Rundhalle Gleisdorf (BNr. 65), aus: [Beer 1963], Bild 1
- Bild 8-16 Detail einer Treibhausverglasung und Querschnitt durch eine wetterdichte Verglasung eines Seilnetzes mit Spiegelglas, aus: [Otto 1954], S. 74
- Bild 8-17 Hängedach mit Oberlichtern im Bereich der Zuschauertribünen, Entfall der Oberlichter nach umfassender Sanierung 2008, Sportschwimmhalle Dresden (BNr. 22), Ausschnitt aus: [Rickenstorf 1982], S. 233 und [Google Earth]
- Bild 8-18 Hängedach mit bis heute erhaltenen Oberlichtern im Bereich der Zuschauertribünen, Sportschwimmhalle Potsdam (BNr. 9), aus: [Böhme 2009], Bild 2 und [Google Earth]

- Bild 8-19 Anordnung von Oberlichtern bei durchlaufender Gitternetz-Tragstruktur, Ovalbau Allrussische Ausstellung (BNr. 94), Ausschnitt aus: [Graefe 1990-2], S. 37 und 38
- Bild 8-20 Ausbildung eines einzelnen großen „Oberlichts“ durch Schließen des Auges der Seilnetzkonstruktion mit Acrylglas-Platten, Institut für Leichte Flächentragwerke Stuttgart (IL) (BNr. 32), aus: Dia-Archiv des Instituts für Tragwerksplanung, TU Braunschweig
- Bild 8-21 Beleuchtung des Kirchenraums durch fehlende Dachausfachung im Durchdringungsbereich mit der seitlich verglasten Halbtonne, St. Paulus Kirche Velbert (BNr. 19), aus: [Voigt 2006], S. 91
- Bild 8-22 Oberlichtbänder parallel zur Lage der Hängebänder, Lufthansa-Wartungshalle Frankfurt (BNr. 24), aus: [Dechau 1990], S. 106 und [Thon 1970], Bild 22
- Bild 8-23 Anordnung von Lichtbändern parallel zur Spannrichtung, David L. Lawrence Convention Center Pittsburgh (BNr. 77), aus: [Pittsburgh]
- Bild 8-24 Oberlichtband am Dachtiefpunkt quer zur Spannrichtung, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3], S. 54
- Bild 8-25 Tragseile ohne und mit Eindeckung, Fußballstadion Braga (BNr. 54), aus: [Stock 2005], S. 57
- Bild 8-26 Belichtung über Glasfassaden an den Längsseiten sowie zwei Lichtbänder, Werkhof der Stadtwerke Hohenems (BNr. 60), Ausschnitt aus: [Herzog 2003], S. 221
- Bild 8-27 Detailausbildungen der Lichtbänder, aus: [Detail 2001], S. 888-889
- Bild 8-28 Dachaufsicht auf die dreischiffige Messehalle, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3], S. 54
- Bild 8-29 Querschnitt durch Halle 1, Innenansicht und Außenansicht des verglasten Firstträgers, Neue Messe Stuttgart (BNr. 35), aus: [Detail 2007], S. 1169, eigenes Foto, Stuttgart, September 2008
- Bild 8-30 Dachfläche mit Laternenkonstruktion, Französischer Pavillon Zagreb (BNr. 62), aus: [Otto 1954], S. 26
- Bild 8-31 Radiales Hängedach im Bauzustand und Querschnitt mit verglastem Oberlicht, Stadion Montevideo (BNr. 88), aus: [Otto 1966], S. 30 und [Sanchez 1961], S. 108
- Bild 8-32 Radiales Seilbindersystem mit Dacheindeckung aus halbtransparenten Polyesterplatten, Pavillon der USA auf der Expo 58 in Brüssel (BNr. 44), aus: [Otto 1966], S. 81
- Bild 8-33 Hängedach mit Stahlzugbändern und gläserner Dachhaut, Bahnhofsvordach Ulm (BNr. 36), aus: [Jauss]
- Bild 8-34 Dach mit abgehängten Glasplatten, Bahnsteigüberdachung Heilbronn (BNr. 29), aus: [Schlaich 2001], S. 821
- Bild 8-35 Hängedachbauwerk mit verglasten Dach- und Wandflächen, Römertherme Baden (BNr. 66), aus: [Bögle 2005], S. 175
- Bild 8-36 Direkte und indirekte Lichteinstrahlung bei Tag und Nacht, natürliche und künstliche Lichtlenkung, Lowara Company Offices in Montecchio Maggiore (BNr. 61), aus: [Angélil 1987], S. 38 und 37
- Bild 8-37 Lenkung von Tageslicht und natürliche Lüftung, c-Office Nagoya (BNr. 97), aus: [Cellarius 2004], S. 835

- Bild 8-38 Prinzip der Be- und Entlüftung des Innenraums, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), Ausschnitt aus: [Herzog 1996-3], S. 29
- Bild 8-39 Gläserner Luftkanal, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), aus: [Herzog 1996-3].S. 24
- Bild 8-40 Übersicht der Tageslichtführung im Teilschnitt, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), Ausschnitt aus: [Herzog 1996-3], S. 31
- Bild 8-41 Übersicht der künstlichen Beleuchtung im Teilschnitt, Messehalle 26 Hannover (BNr. 10), Ausschnitt aus: [Herzog 1996-3], S. 31

11 Anhang

11.1 Geografische Übersichten

Die geografischen Übersichten zeigen die Standorte der in der Arbeit näher untersuchten Bauwerke getrennt nach:

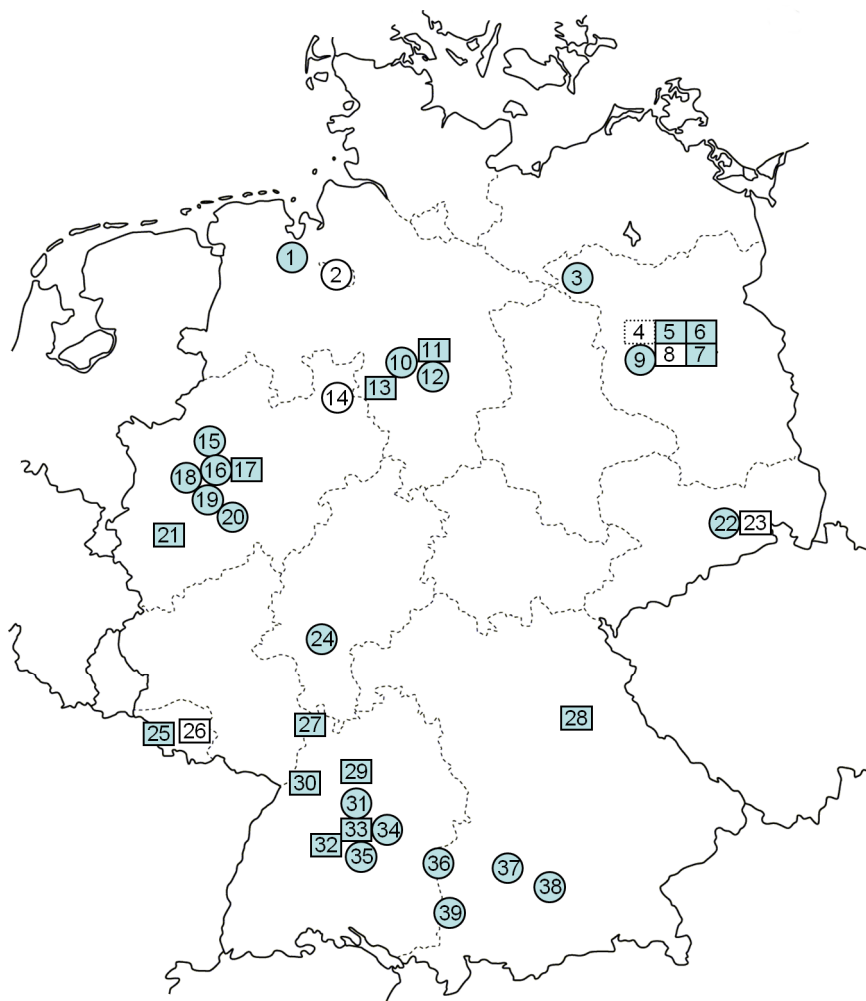
- Deutschland
- Europa (ohne Deutschland)
- USA
- Welt (ohne USA und Europa)

In den Darstellungen wird unterschieden zwischen Hängedächern und artverwandten Konstruktionen, zwischen bestehenden und rückgebauten Bauwerken sowie Bauwerksentwürfen.

Die Bauwerke werden anhand ihrer Bauwerks-Nummer (BNr.), der Bezeichnung, dem Standort und dem Jahr der Fertigstellung aufgelistet. Weitere Informationen sind in den Datenblättern im nachfolgenden Gesamtverzeichnis (Kapitel 11.3, ab Seite 238) enthalten.

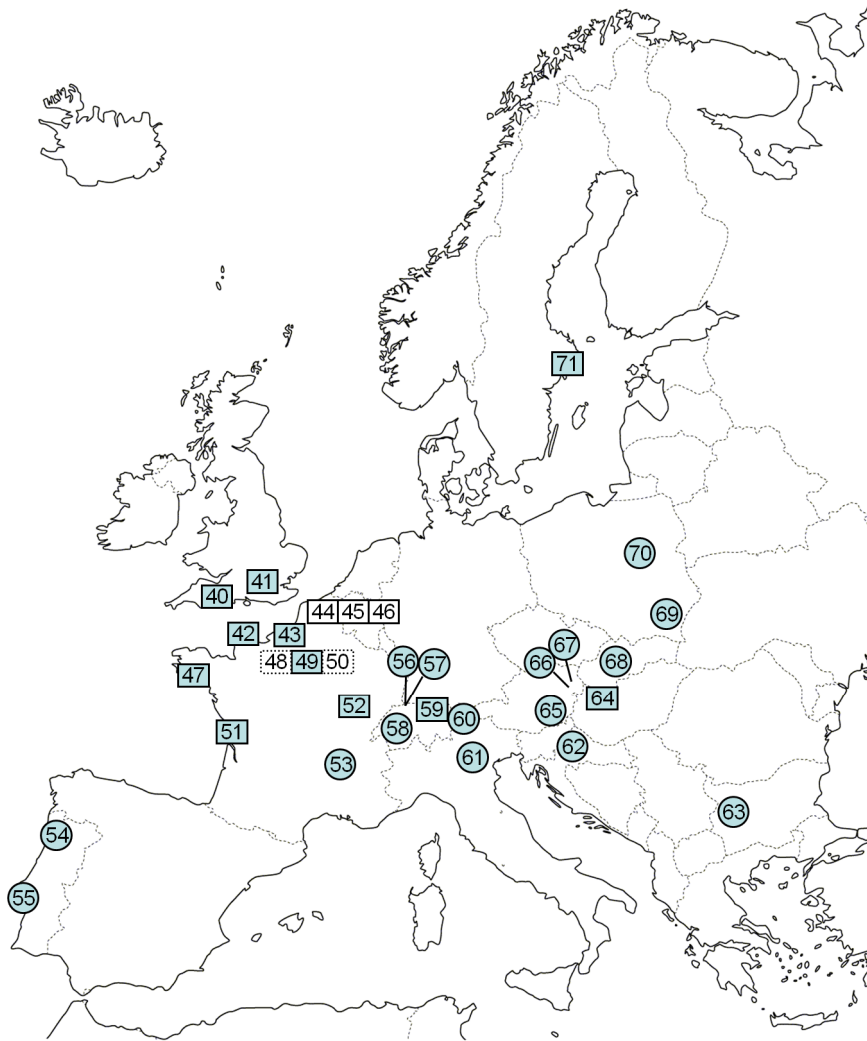
Legende:

	Hängedach, bestehend
	Hängedach, rückgebaut
	Hängedach, Entwurf
	artverwandtes Dach, bestehend
	artverwandtes Dach, rückgebaut
	artverwandtes Dach, Entwurf



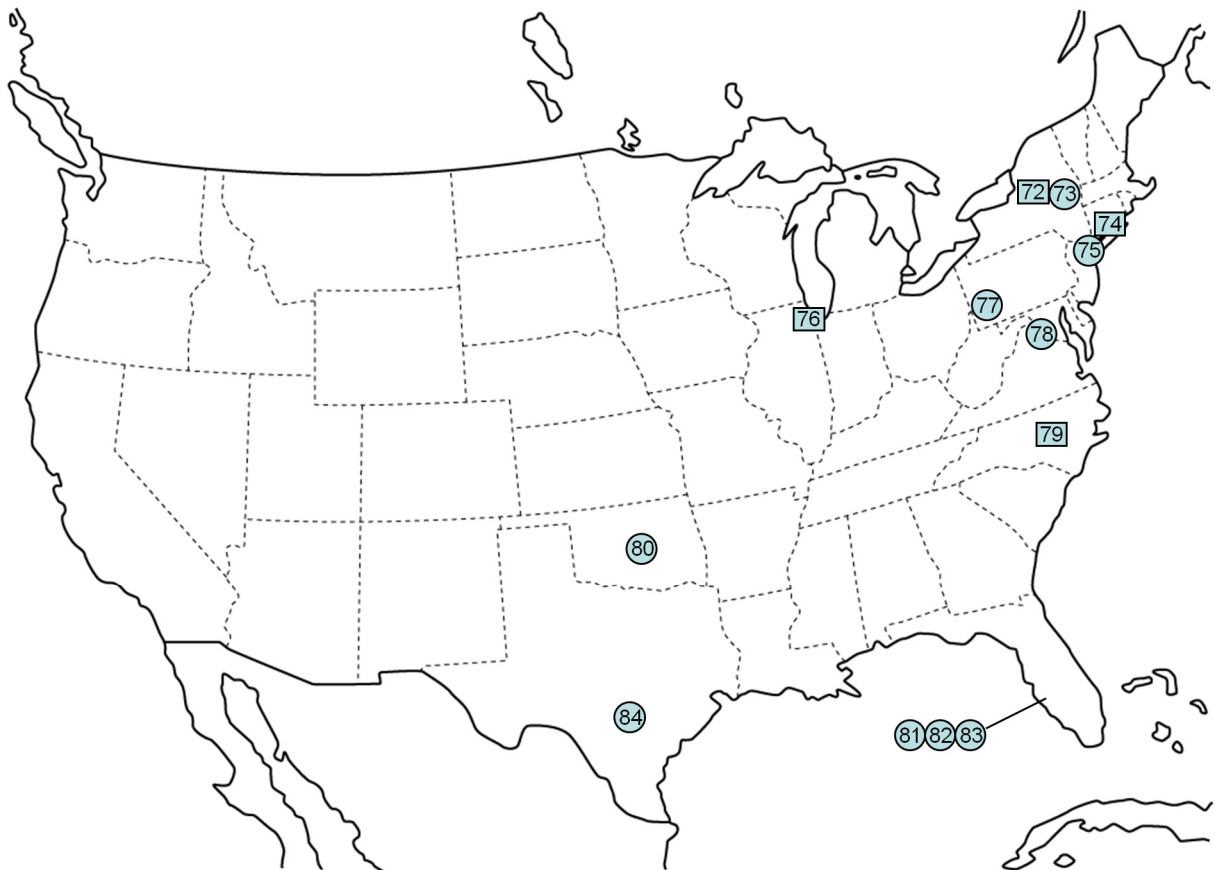
Deutschland

Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr	Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr
1	Aula	Oldenburg	1963	21	Feierabendhaus	Hürth	1957
2	Stadthalle	Bremen	1964	22	Sportschwimmhalle	Dresden	1969
3	Unterstellhalle	Groß Langerwisch	1969	23	Sängerhalle	Dresden	1865
4	Überdachung Olympiastadion	Berlin	1970	24	Lufthansa-Wartungshalle	Frankfurt	1970
5	Kongresshalle	Berlin	1957	25	Sendergebäude Europe 1	Felsberg-Berus	1955
6	Reparaturhalle für Omnibusse	Berlin-Weißensee	1963	26	Stadtbad	Neunkirchen	1961
7	Philharmonie	Berlin	1963	27	Friedrich-Ebert-Halle	Ludwigshafen	1965
8	Schweizer Pavillon	Berlin	1952	28	Kurfürstenbad	Amberg	1999
9	Sportschwimmhalle	Potsdam	1971	29	Bahnsteigüberdachung	Heilbronn	2001
10	Messehalle 26	Hannover	1996	30	Schwarzwaldhalle	Karlsruhe	1953
11	Tagungszentrum	Hannover	1989	31	Gemeindezentrum	Stuttgart-Sonnenberg	1965
12	Messehalle 9	Hannover	1998	32	Inst. f. Leichte Flächentragwerke IL	Stuttgart	1967
13	Fertigungspavillons	Bad Münster	1987	33	Mercedes-Forum	Stuttgart	1998
14	Vordach am Schlossplatz	Detmold	1836	34	Selbstbedienungsladen	Stuttgart	1956
15	Forum Europaplatz	Castrop-Rauxel	1976	35	Neue Messe	Stuttgart	2007
16	Westfalenhalle 4	Dortmund	1959	36	Bahnhofsvordach	Ulm	1993
17	Dach Bundesgartenschau	Dortmund	1969	37	Sporthalle	Augsburg	1965
18	Kirche Heilig-Geist	Essen-Katernberg	1956	38	Rudi-Sedlmayer-Halle	München	1972
19	St. Paulus Kirche	Velbert	1955	39	Werkhalle	Memmingen	1957
20	Schwimmoper	Wuppertal	1957				



Europa (ohne Deutschland)

Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr	Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr
40	Hooke Park College	Hooke	1985	56	Theater	Basel	1975
41	Serpentine Gallery Pavillon	London	2003	57	Sporthalle St. Jakob	Basel	1976
42	Flugzeughalle	Cherbourg	1917	58	Saalbau-Hallenbad	Biel	1966
43	Kirche Jeanne D'Arc	Rouen	1979	59	Bruder-Klaus-Kirche	St.Gallen - Winkeln	1959
44	Pavillon der USA	Brüssel	1958	60	Werkhof	Hohenems	1999
45	Pavillon de la France	Brüssel	1958	61	Lowara Company Offices	Montecchio Maggiore	1985
46	Informationspavillon	Brüssel	1958	62	Französischer Pavillon	Zagreb	1937
47	Fertigungshalle	Lorient	1837	63	Techn. Oberschule für Energetik	Sofia	1979
48	Ausstellungshalle	Paris	1937	64	Theater	Győr	1978
49	Rotunde Panorama	Paris	1839	65	Rundhalle	Gleisdorf	1963
50	Centre des Industries Mécaniques	Paris	1951	66	Römertherme	Baden	1999
51	Kirche Notre Dame	Royan	1958	67	Flughafenterminal	Wien-Schwechat	1959
52	Sportpalast	Dijon	1976	68	Wohnhaus	Banská Bystrica	1826
53	Maison de la Culture	Firminy	1966	69	Sporthalle	Rzeszów	1966
54	Fußballstadion	Braga	2003	70	Olympisches Trainingszentrum	Warschau	1968
55	Portugiesischer Pavillon	Lissabon	1998	71	Eisstadion Hovet	Stockholm-Johannesh.	1955



USA

Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr	Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr
72	Stadthalle	Utica	1959	79	Raleigh-Arena	Raleigh	1953
73	Getreidelagerhalle	Albany	1933	80	Oklahoma State Fair Arena	Oklahoma City	1965
74	Hockey-Stadion	New Haven	1959	81	Cocoon / Healy Guest House	Sarasota	1950
75	Madison Square Garden Arena	New York	1968	82	Coward Residence	Sarasota	1951
76	Lokomotiv-Ausstellungspavillon	Chicago	1933	83	Wheelan Cottages	Sarasota	1951
77	D. L. Lawrence Convention Center	Pittsburgh	2003	84	Villita Assembly Building	San Antonio	1960
78	Terminal Dulles Internat. Airport	Dulles (Chantilly)	1962				



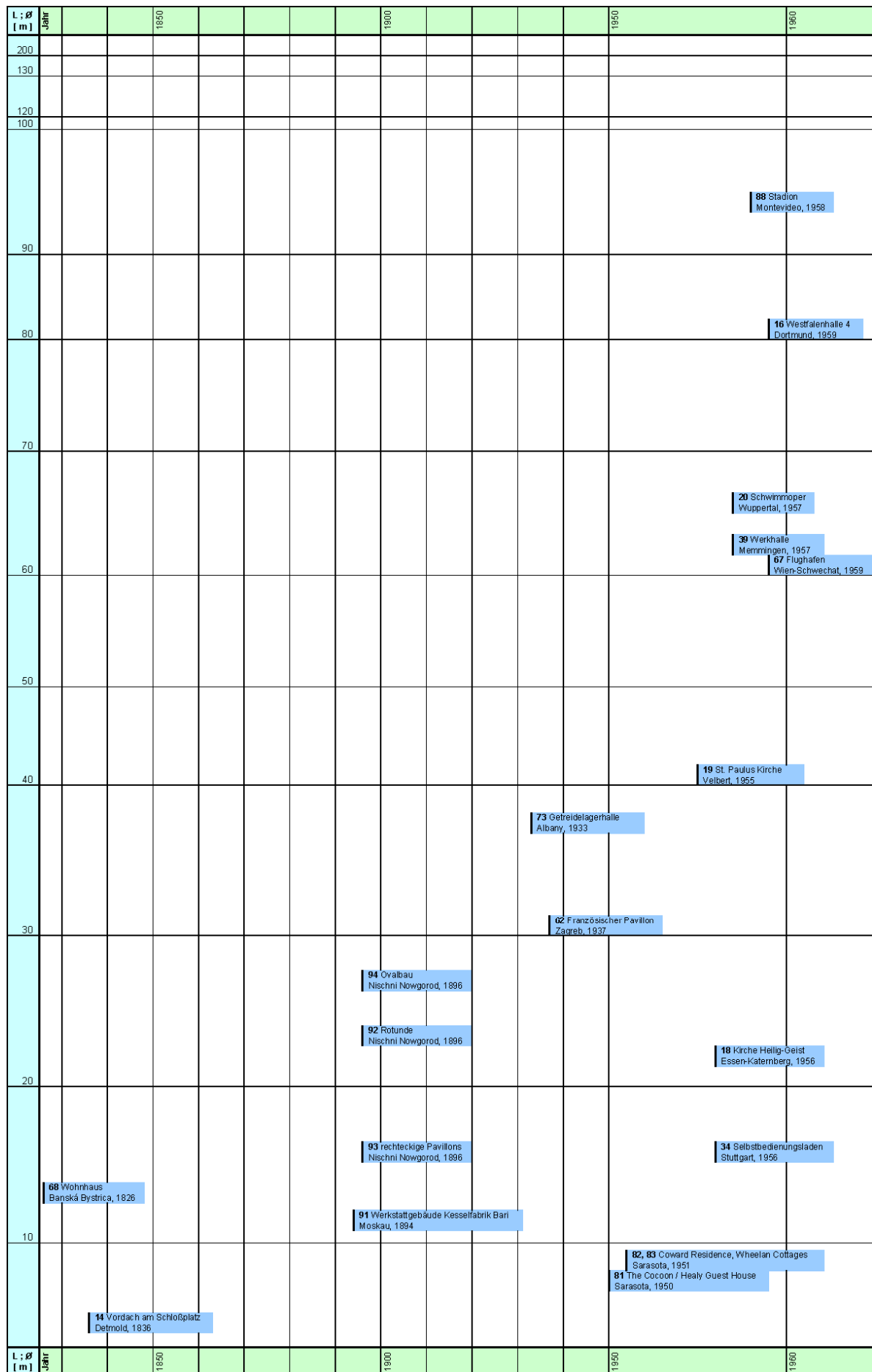
Welt (ohne Europa und USA)

Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr	Nr.	Bezeichnung	Standort	Jahr
85	Sowjetischer Pavillon	Montreal (→ Moskau)	1967	93	Rechteckige Pavillons	Nischni Nowgorod	1896
86	Sporthalle	Havanna	1959	94	Ovalbau	Nischni Nowgorod	1896
87	Ausstellungshalle Rio Grande d. Sul	Sao Paulo	1954	95	Konferenzzentrum	Mekka	1974
88	Stadion	Montevideo	1958	96	Luce-Kapelle Tunghai-Universität	Taichung City	1963
89	Kathedrale Saint Paul	Abidjan	1985	97	c-Office	Nagoya	2004
90	Hangar	Bizerta	1917	98	1. Sporthalle Yoyogi	Tokio	1964
91	Werkstattgebäude Kesselfabrik Bari	Moskau	1894	99	2. Sporthalle Yoyogi	Tokio	1964
92	Rotunde	Nischni Nowgorod	1896	100	Versammlungshalle	Shizuoka	1957

11.2 Chronologische Übersicht

Das folgende Diagramm zeigt eine chronologische Übersicht über die in dieser Arbeit näher untersuchten Bauwerke. Die Darstellung beschränkt sich auf Bauwerke mit Hängedächern. Aufsteigend nach dem Jahr der Fertigstellung werden vergleichend die Spannweiten, bei radialen Systemen der Durchmesser der Konstruktionen, angegeben.

Die Bauwerke werden anhand ihrer Bauwerks-Nummer (BNr.) und Bezeichnung unter Angabe des Standorts und Fertigstellungsjahrs beschrieben. Weitere Informationen sind in den Datenblättern im Gesamtverzeichnis (Kapitel 11.3, ab Seite 238) enthalten.

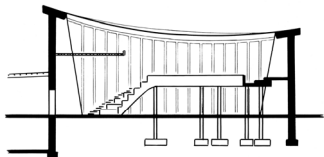


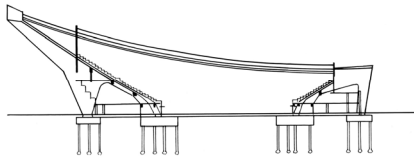
1960	1970	1980	1990	2000	2010	Jahr	L : Ø [m]
				54 Fußballstadion Braga, 2003		200	
	24 Lufthansa-Wartungshalle Frankfurt, 1970					130	
	75 Madison Square Garden Arena New York, 1988			77 Convention Center Pittsburgh, 2003		120	
	80 Oklahoma State Fair Arena Oklahoma City, 1965					100	
			89 Kathedrale Saint Paul Abidjan, 1985				
	2 Stadthalle Bremen, 1964					90	
		57 Sporthalle St. Jakob Basel, 1976					
						80	
	58 Saalbau-Hallenbad Biel, 1966	38 Rudi-Sedlmayer-Halle München, 1972			35 Neue Messe Stuttgart, 2007	70	
				55 Portugiesischer Pavillon Lissabon, 1998			
	37 Sporthalle Augsburg, 1965	56 Theater Basel, 1975				60	
	78 Terminal Dulles Internat. Airport Dulles (Chantilly), 1982			10 Messehalle 26 Hannover, 1996			
	65 Rundhalle Gleisdorf, 1963	15c Forum Europaplatz Castrop-Rauxel, 1976				50	
		95 Konferenzzentrum Mekka, 1974		12 Messehalle 9 Hannover, 1998			
84 Vilita Assembly Building San Antonio, 1960	9 Sportschwimmhalle Potsdam, 1971					40	
	22 Sportschwimmhalle Dresden, 1969						
	69 Sporthalle Rzeszów, 1966	19a Forum Europaplatz Castrop-Rauxel, 1976					
		63 Techn. Oberschule für Energetik Sofia, 1979					
	3 Unterstellhalle Groß Langerwisch, 1969					30	
				66 Römertherme Baden, 1999			
		15a Forum Europaplatz Castrop-Rauxel, 1976		36 Bahnhofsvordach Ulm, 1993			
	53 Maison de la Culture Friminy, 1966						
	31 Gemeindezentrum Stuttgart-Sonnenberg, 1965			60 Werkhof Hohenems, 1999		20	
1 Aula Oldenburg, 1963			61 Lowara Company Offices Montecchio Maggiore, 1985				
	70 Olympisches Trainingszentrum Warschau, 1988				97 c-Office Nagoya, 2004		
96 Luce-Kapelle Tunghai-Universität Taichung City, 1963						10	
1960	1970	1980	1990	2000	2010	Jahr	L : Ø [m]

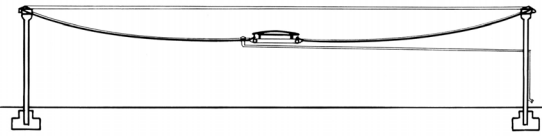
11.3 Gesamtverzeichnis der untersuchten Bauwerke

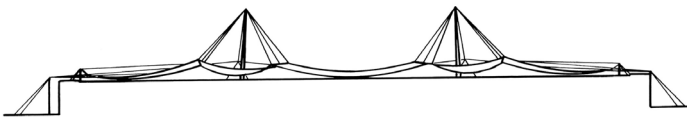
In dem folgenden Gesamtverzeichnis sind alle in der Arbeit näher untersuchten Bauwerke aufgelistet. Die Datenblätter sind in der Reihenfolge der vergebenen Bauwerks-Nummern (BNr.) sortiert. Sie enthalten neben der Bezeichnung und dem Jahr der Fertigstellung eine möglichst genaue Angabe des Standorts. Darüber hinaus sind die am Bau beteiligten Architekten und Ingenieure angegeben.

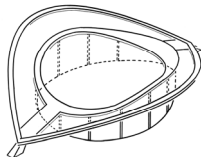
Die Dachkonstruktion wird entsprechend der in dieser Arbeit definierten Typisierung unter Angabe der Grundrissform, den Abmessungen der Dachfläche und der größten Spannweite beschrieben. Gegebenenfalls werden Besonderheiten des Bauwerks vermerkt. Weiterhin sind zu jedem untersuchten Objekt Literaturverweise oder andere Quellen, die Informationen über das Bauwerk liefern, vermerkt.

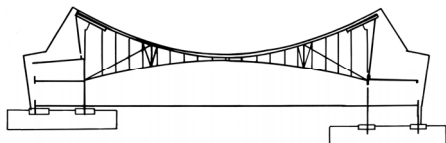
1	Aula Oldenburg	1963
Skizze:		
Standort:	Neues Gymnasium Oldenburg Alexanderstraße 90 26121 Oldenburg Deutschland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	20 m / 21 m	
Spannweite (max.):	20 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Bauwelt 1963]	

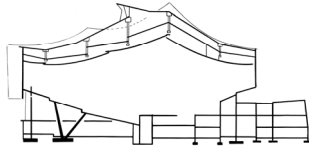
2	Stadthalle Bremen	1964
Skizze:		
Standort:	Bremen Arena (davor: AWD-Arena) Theodor-Heuss-Allee 21-23 28215 Bremen Deutschland	
Architekt:	Roland Rainer, Wien (vor Umbau)	
Ingenieur:	Ulrich Finsterwalder (Fa. DYWIDAG)	
Dachtyp:	Hängedach (vor Umbau)	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	95 m / 80 m	
Spannweite (max.):	95 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:	Hängedach nach Umbau durch Fachwerkträger ersetzt	
Quellenverweise:	[Schmidt 2003] [Winkler 2000] [Eisele 2003] [Büttner 1985] [Rühle 1970] [Mehmel 1966]	

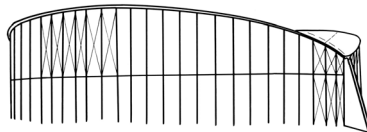
3	Unterstellhalle Groß Langerwisch	1969
Skizze:		
		
Standort:	Dorfstraße 16928 Groß Langerwisch, Groß Pankow (Prignitz) Deutschland	
Architekt:	Ackermann, Friedrich, Pöschel, Hoffmann	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 31,60 m	
Spannweite (max.):	Ø 31,60 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Rühle 1970]	

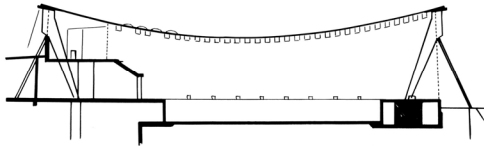
4	Überdachung Olympiastadion Berlin	1970
Skizze:		
		
Standort:	Olympiastadion Berlin Olympischer Platz 3 14053 Berlin Deutschland	
Architekt:	Frei Otto, Rolf Gutbrod, Bernd Oleiko, Einar Thorsteinn	
Ingenieur:	Ove Arup, Ted Happold, Peter Rice	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	nicht ausgeführter Entwurf	
Quellenverweise:	[Otto 1970]	

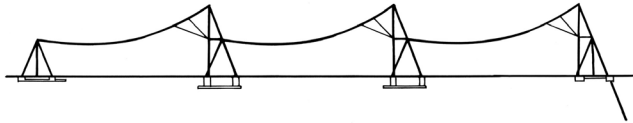
5	Kongresshalle Berlin	1957
Skizze:		
		
Standort:	Haus der Kulturen der Welt John-Foster-Dulles-Allee 10 10557 Berlin - Tiergarten Deutschland	
Architekt:	Prof. Hugh A. Stubbins, Cambridge, Mass.	
Ingenieur:	Severud, Elstad und Krueger, New York	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	78 m / 61 m	
Spannweite (max.):	78 m bzw. 61 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	nach Einsturz wiederaufgebaut	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Fleckner 1957]	

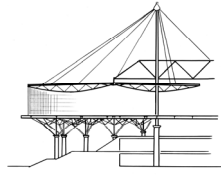
6	Reparaturhalle für Omnibusse Berlin-Weißensee	1963
Skizze:		
		
Standort:	Betriebshof Indira-Ghandi-Straße Indira-Ghandi-Straße 98 13053 Berlin Deutschland	
Architekt:	VEB Industrieprojektierung Berlin	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Seilbinder	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	50 m / 129 m	
Spannweite (max.):	50 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Büttner 1985] [Rühle 1970] [Rabinovič 1966]	

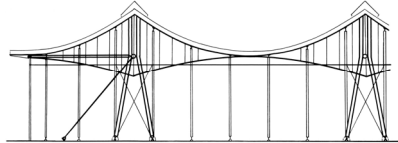
7	Berliner Philharmonie	1963
Skizze:		
		
Standort:	Berliner Philharmonie Herbert-von-Karajan-Straße 1 10785 Berlin Deutschland	
Architekt:	Hans Scharoun	
Ingenieur:	Werner Weber, Werner Köpke	
Dachtyp:	Träger mit untergehängter Decke	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b / h):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A.	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Raiß 1962] [Greth 1964] [Otto 1985]	


8	Schweizer Pavillon	1952
Skizze:		
		
Standort:	Schweizer Pavillon, Deutsche Industrieausstellung, Messe Berlin Messedamm 22 14055 Berlin Deutschland	
Architekt:	Hans Stettbacher	
Ingenieur:	Hans Osterwald, Hans Morant	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b / h):	25 m / 32 m	
Spannweite (max.):	25 m bzw. 32 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	abgebaut	
Quellenverweise:	[Otto 1952] [Otto 1953-2] [Otto 1954]	

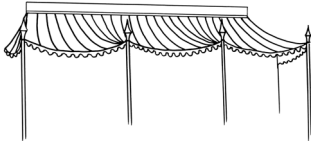
9	Sportschwimmhalle Potsdam	1971
Skizze:		
		
Standort:	Bad Am Brauhausberg Max-Planck-Straße 10 14460 Potsdam Deutschland	
Architekt:	Günther Nichtitz	
Ingenieur:	Projektierung für Sportbauten	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	39,50 m / 60 m	
Spannweite (max.):	39,50 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	Anfang der 1990er und 2008 saniert	
Quellenverweise:	[Böhme 2009] [Kasiske 2009] [Potsdam]	

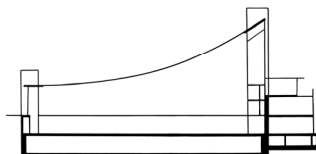
10	Messehalle 26	1996
Skizze:		
		
Standort:	Deutsche Messe Messegelände 30521 Hannover Deutschland	
Architekt:	Thomas Herzog, Hanns Jörg Schrade (Herzog und Partner)	
Ingenieur:	Schlaich, Bergermann und Partner; Renk Horstmann Renk	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	220 m / 115 m	
Spannweite (max.):	55 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Archplus 1996] [Herzog 1996-1] [Sandaker 2008] [Bauen mit Holz 1997] [Henning 1997] [Bauzentrum 1999] [Herzog 1996-2] [Rosemeier 1998] [Schunck 2002] [Werk 1997] [Bögle 2005] [Herzog 1996-3]	

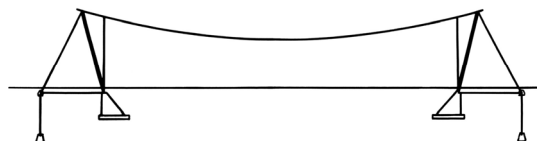
11	Tagungszentrum	1989
Skizze:		
		
Standort:	Deutsche Messe Messegelände 30521 Hannover Deutschland	
Architekt:	Hinrich Storch, Walter Ehlers, Hannover	
Ingenieur:	Konsortium Tagungs-Centrum Hannover Messe	
Dachtyp:	abgehängtes Trägerdach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø etwa 50 m	
Spannweite (max.):	etwa 25 m (Träger)	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Detail 1990]	

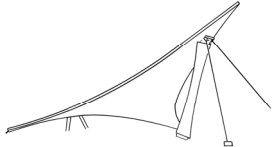
12	Messehalle 9	1998
Skizze:		
		
Standort:	Deutsche Messe Messegelände 30521 Hannover Deutschland	
Architekt:	von Gerkan Marg und Partner, Hamburg	
Ingenieur:	Schlaich, Bergermann und Partner; Renk Horstmann Renk	
Dachtyp:	Hängedach mit Unterspannung	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	137,50 m / 235 m	
Spannweite (max.):	15 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Bögle 2005] [Schlaich]	

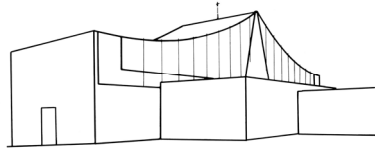
13	Fertigungspavillons	1987
Skizze:		
		
Standort:	Wilkening + Hahne GmbH+Co.KG Fritz-Hahne-Straße 8 31848 Bad Münster-Eimbeckhausen Deutschland	
Architekt:	Frei Otto, Christine Otto-Kanstinger	
Ingenieur:	M. Speich, F.-J. Hinkes, Hannover	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	quadratisch mit abgeschrägten Ecken	
Abmessungen (l / b):	22 m / 22 m	
Spannweite (max.):	etwa 9,50 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Speich 1988] [Otto 1995] [Nerdinger 2005] [Herzog 2003]	

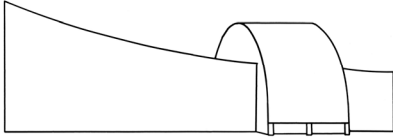
14	Vordach am Schlossplatz	1836
Skizze:		
		
Standort:	Schloßwache Lange Straße 58 32756 Detmold Deutschland	
Architekt:	Ferdinand Wilhelm Brune	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	annähernd rechteckig	
Abmessungen (l / b):	2,80 m / 8,75 m	
Spannweite (max.):	2,80 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	1981 abgerissen, durch ähnlichen Nachbau ersetzt	
Quellenverweise:	[Graefe 1984]	

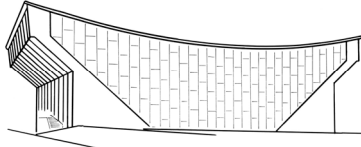
15	Forum Europaplatz	1976
Skizze:		
		
Standort:	Forum Castrop-Rauxel Europaplatz 1 44575 Castrop-Rauxel Deutschland	
Architekt:	Arne Jacobsen	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach (3 Gebäude)	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	22 m / 34 m; 36 m / 68 m; 49,50 m / 34 m	
Spannweite (max.):	20 m; 36 m; 49,50 m, jeweils einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Gerber 1993] [Altenstadt 1978]	

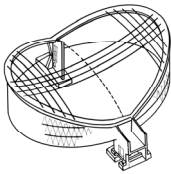
16	Westfalenhalle 4	1959
Skizze:		
		
Standort:	Westfalenhallen Dortmund Rheinlanddamm 200 44139 Dortmund Deutschland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Hochtief AG	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	80 m / 110 m	
Spannweite (max.):	80 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1966] [Rühle 1970] [Vaessen 1959] [Probst 1960]	

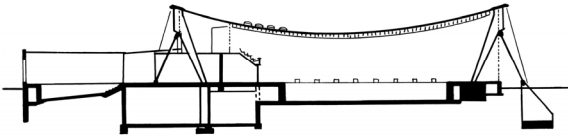
17	Dach Bundesgartenschau	1969
Skizze:		
		
Standort:	Westfalenpark Dortmund An der Buschmühle 3 44139 Dortmund Deutschland	
Architekt:	Minke / Günter Behnisch	
Ingenieur:	Julius Natterer	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen:	Länge der Diagonalen etwa 55 m / 60 m	
Spannweite (max.):	55 m bzw. 60 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Natterer 1969] [Halasz 1996]	

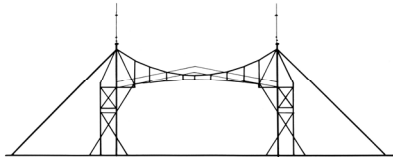
18	Kirche Heilig-Geist	1956
Skizze:		
		
Standort:	Katholische Kirchengemeinde Heilig-Geist Meybuschhof 13 45327 Essen-Katernberg Deutschland	
Architekt:	Gottfried Böhm, Köln	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	42 m / 10 m	
Spannweite (max.):	2 x 21 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Born 1964] [Voigt 2006]	

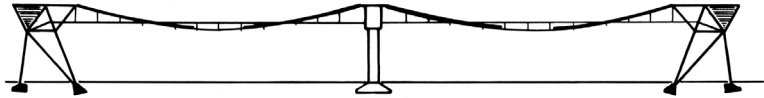
19	St. Paulus Kirche	1955
Skizze:		
		
Standort:	St. Paulus Kirche Heidestraße 202 42549 Velbert Deutschland	
Architekt:	Gottfried Böhm, Köln	
Ingenieur:	Leopold Wolf	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	40 m / 12 m	
Spannweite (max.):	40 m, einachsrig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Born 1964] [Voigt 2006] [Weyres 1957] [Otto 1955] [Giefer 1960]	

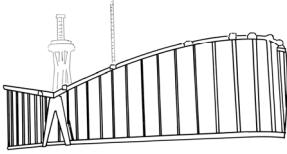
20	Schwimmoper Wuppertal	1957
Skizze:		
		
Standort:	Schwimmoper Elberfeld Südstraße 29 42103 Wuppertal Deutschland	
Architekt:	Friedrich Hetzelt	
Ingenieur:	Fritz Leonhard, Dyckerhoff & Widmann KG	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	65 m / 40 m	
Spannweite (max.):	65 m, einachsrig gespannt	
Bemerkungen:	2005-2010 Sanierung der Halle	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Krauss 2000] [Büttner 1985] [Rühle 1970] [Hetzelt 1957] [Rabinovič 1966] [Kleinmanns 2009] [Probst 1960] [LeRoi 1958] [Weiss 2011]	

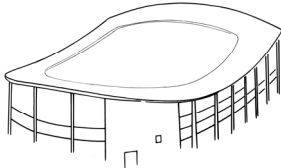
21	Feierabendhaus	1957
Skizze:		
		
Standort:	Chemiepark Knapsack Industriestrasse 50354 Hürth Deutschland	
Architekt:	Karl Hell, Köln	
Ingenieur:	Beton- und Monierbau A.G.	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	45,20 m / 37,20 m	
Spannweite (max.):	45,20 m bzw. 37,20 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	steht seit 1988 unter Denkmalschutz; 1996 Einstufung als erhaltenswertes Kulturgut durch das Land Nordrhein-Westfalen	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Sanchez 1961] [Giefer 1960] [Probst 1960]	

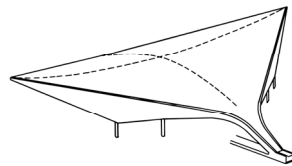
22	Sportschwimmhalle Dresden	1969
Skizze:		
		
Standort:	Schwimmsportkomplex Freiburger Platz Freiberger Platz 1a 01067 Dresden Deutschland	
Architekt:	Günther Nichtitz, Eva Kaltenbrunn, Eitel Jackowski	
Ingenieur:	Projektierung für Sportbauten	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	39,50 m / 60 m	
Spannweite (max.):	39,50 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:	2008 Sanierung, unter Denkmalschutz gestellt	
Quellenverweise:	[Rickenstorf 1982] [Bräuer 1971] [Quade 2009] [Kasiske 2009] [Quade 1969] [Dresden]	

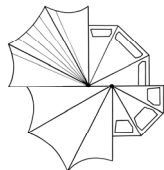
23	Sängerhalle	1865
Skizze:		
		
Standort:	Dresden Deutschland	
Architekt:	Eduard Müller, Ernst Giese	
Ingenieur:	Julius Weisbach	
Dachtyp:	abgehängte, seilverspannte Gitterträger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	76,50 m / 163 m (mit Vorbauten)	
Spannweite (max.):	etwa 60 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	abgebaut	
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Graefe 1989]	

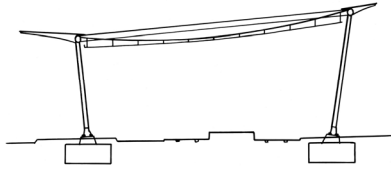
24	Lufthansa-Wartungshalle	1970
Skizze:		
		
Standort:	Rhein-Main Flughafen Airportring / Querspange Kelsterbach 60547 Frankfurt Deutschland	
Architekt:	Beckert und Becker, Frankfurt	
Ingenieur:	Helmut Bomhard (Dyckerhoff und Widmann), München	
Dachtyp:	Hängedach , teilweise seilverspannt	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	321 m / 102 m	
Spannweite (max.):	2 x 130 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	1990 saniert	
Quellenverweise:	[Dechau 1990] [Büttner 1985] [Schulitz 1989] [Thon 1970]	

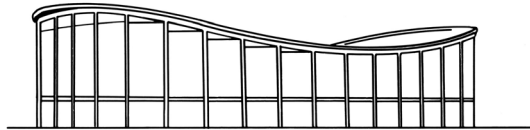
25	Sendergebäude Europe 1	1955
Skizze:		
		
Standort:	Europäische Rundfunk- und Fernsehgesellschaft mbH Ittersdorfer Straße 101 66802 Felsberg-Berus/Überherrn Deutschland	
Architekt:	Jean-François Guédy, Eugène Freyssinet	
Ingenieur:	Eugène Freyssinet	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	86,50 m / 46 m	
Spannweite (max.):	86,50 m bzw. 46 m	
Bemerkungen:	steht unter Denkmalschutz	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Misch 1956] [Memotransfront]	

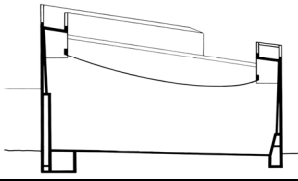
26	Stadtbad	1961
Skizze:		
		
Standort:	Stadtbad Neunkirchen Mantes-la-Ville-Platz 66538 Neunkirchen Deutschland	
Architekt:	Stockhausen	
Ingenieur:	Pabst, Saarbrücken; Albert, Neunkirchen	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd oval	
Abmessungen (l / b):	47 m / 26-35 m	
Spannweite (max.):	47 m bzw. 35 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	2009 abgerissen	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Papst 1959]	

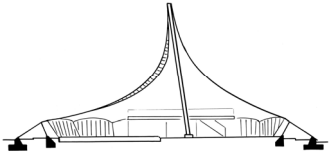
27	Friedrich-Ebert-Halle	1965
Skizze:		
		
Standort:	Friedrich-Ebert-Halle Erzbergerstraße 89 67063 Ludwigshafen Deutschland	
Architekt:	Roland Rainer	
Ingenieur:	Ulrich Finsterwalder (D+W)	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	quadratisch	
Abmessungen (l / b):	56,80 / 56,80 m	
Spannweite (max.):	80,30 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Günschel 1966] [Schmidt 2003] [Büttner 1985] [Mehmel 1966]	

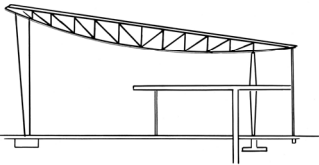
28	Kurfürstenbad	1999
Skizze:		
		
Standort:	Kurfürstenbad Amberg Kurfürstenring 2 92224 Amberg Deutschland	
Architekt:	G.A. Wörrlein, Nürnberg	
Ingenieur:	Planungsgesellschaft Natterer & Dittrich mbH, München	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (r):	36 – 43 m (Radius)	
Spannweite (max.):	43 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Natterer 1993]	

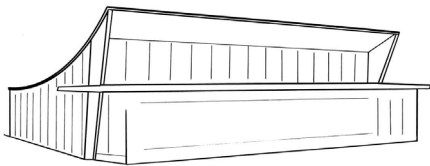
29	Bahnsteigüberdachung	2001
Skizze:		
		
Standort:	Hauptbahnhof Heilbronn Bahnhofstraße 74072 Heilbronn Deutschland	
Architekt:	Auer + Weber + Partner, Stuttgart	
Ingenieur:	Schlaich, Bergemann und Partner, Stuttgart	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	27,51 m (einschl. Kragarme) / 39,38 m	
Spannweite (max.):	21 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schlaich 2001] [Bögle 2005]	

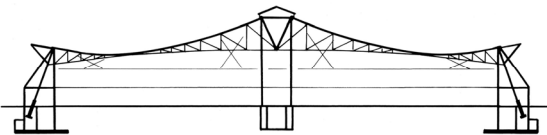
30	Schwarzwaldhalle	1953
Skizze:		
		
Standort:	Schwarzwaldhalle Karlsruhe Festplatz 9 76137 Karlsruhe Deutschland	
Architekt:	E. Schelling, Karlsruhe	
Ingenieur:	Finsterwalder (Dyckerhoff & Widmann KG.), Franz Dischinger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	73,50 m / 48,60 m	
Spannweite (max.):	73,50 m bzw. 48,60 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	seit 2000 „Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung“, 2008 saniert	
Quellenverweise:	[Born 1964] [Otto 1954] [Sanchez 1961] [Addis 2007] [Bauwelt 1953] [Nerdinger 2005] [Rabinovič 1966] [Giefer 1960] [Probst 1960] [Bauwelt 1954] [Kurz 2007] [Picon 1997] [Karlsruhe]	

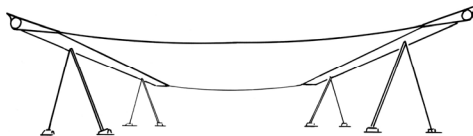
31	Gemeindezentrum	1965
Skizze: 		
Standort:	Ev. Kirchengemeinde Sonnenberg Johannes-Krämer-Straße 2-4 70597 Stuttgart-Sonnenberg Deutschland	
Architekt:	Ernst Giesel, Karst und Kimmig	
Ingenieur:	Fritz Leonhardt, Frei Otto	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	20 m / 16,50 m	
Spannweite (max.):	20 m bzw. 16,50 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Grüniger 1969] [Nerdinger 2005]	

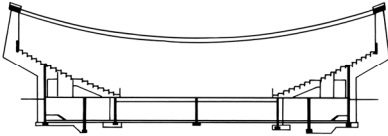
32	Institut für Leichte Flächentragwerke IL	1967
Skizze: 		
Standort:	heute: Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK) Pfaffenwaldring 14 70569 Stuttgart Deutschland	
Architekt:	Frei Otto	
Ingenieur:	Fritz Leonhardt, Harald Egger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	1965 Aufbau, 1968 Umsetzung und Ausbau, 1993 Renovierung, heute denkmalgeschützt	
Quellenverweise:	[Otto 1985] [Wörner 1991] [Campusführer]	

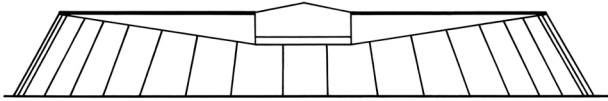
33	Mercedes-Forum	1998
Skizze:		
Standort:	Mercedes-Benz Niederlassung Stuttgart Heilbronner Straße 339 70469 Stuttgart Deutschland	
Architekt:	Peter Kopp, Stuttgart	
Ingenieur:	GFI Gesellschaft für Ingenieurplanung, Stuttgart	
Dachtyp:	gebogene Fachwerkträger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	45 m / 130 m	
Spannweite (max.):	45 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Powerhouse]	

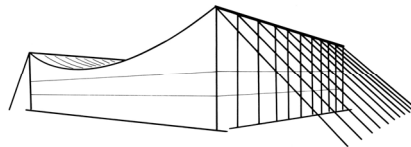
34	Selbstbedienungsladen	1956
Skizze:		
Standort:	heute: Kunst und Kultur Café Luxem Gerokstraße 12 70188 Stuttgart Deutschland	
Architekt:	Eduard W. Hanow	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	trapezförmig	
Abmessungen (l / b):	15 m / 10-17 m	
Spannweite (max.):	15 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Wörner 1991] [Kurz 2007]	

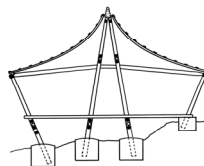
35	Neue Messe	2007
Skizze:		
		
Standort:	Landesmesse Stuttgart GmbH Messepiazza 1 70629 Stuttgart Deutschland	
Architekt:	Wulf & Partner, Stuttgart	
Ingenieur:	Mayr & Ludescher	
Dachtyp:	Hängedach , teilweise unterspannt (1 zwei-, 7 einschiffige Hallen)	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	70 m bzw. 140 m / 150 m	
Spannweite (max.):	70 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Wettbewerbe 2007] [Detail 2007] [Brux 2010] [Kiehn 2006]	

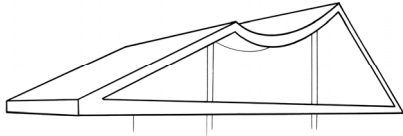
36	Bahnhofsvordach	1993
Skizze:		
		
Standort:	Hauptbahnhof Ulm Bahnhofplatz 1 89073 Ulm Deutschland	
Architekt:	Jauss + Gaupp Architekten, Friedrichshafen	
Ingenieur:	Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	23,40 m / etwa 40 m	
Spannweite (max.):	23,40 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schober 2003] [Schlaich 2001] [Bögle 2005] [Jauss]	

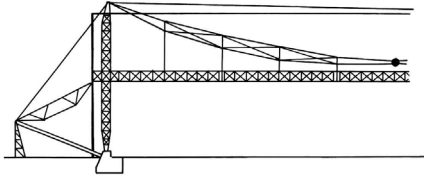
37	Sporthalle	1965
Skizze:		
		
Standort:	Sporthalle Augsburg Ulrich-Hofmaier-Straße 30 86159 Augsburg Deutschland	
Architekt:	Ingenieurbüro Hugo Gall, Reutlingen	
Ingenieur:	Baufirma Thormann und Stiefel (Thosti)	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	61,50 m / 49 m	
Spannweite (max.):	60,60 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	1990 saniert, seit 2003 in die Denkmalliste eingetragen	
Quellenverweise:	[Mehmel 1966]	

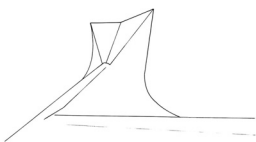
38	Rudi-Sedlmayer-Halle	1972
Skizze:		
		
Standort:	Audi Dome Siegenburger Straße 45 81373 München Deutschland	
Architekt:	Georg Flinkerbusch	
Ingenieur:	Fa. Binder + Co. AG	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 85-72 m	
Spannweite (max.):	Ø 72 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schröter 1972]	

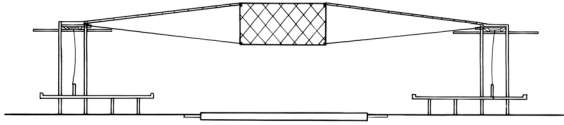
39	Werkhalle	1957
Skizze:		
		
Standort:	Allgäu Airport GmbH & Co. KG Am Flughafen 35 87766 Memmingerberg Deutschland	
Architekt:	Paul Gerne, Augsburg	
Ingenieur:	Firma Dyckerhoff & Widmann KG	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	61 m / 50 m	
Spannweite (max.):	61 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Born 1964] [Sanchez 1961] [Rabinovič 1966] [LeRoi 1958]	

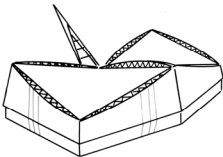
40	Hooke Park College	1985
Skizze:		
		
Standort:	Hooke Park Hooke Beaminster, Dorset Großbritannien	
Architekt:	P. Ahrends; R. Burton; P. Koralek, London; Frei Otto, Stuttgart	
Ingenieur:	E. Happold, Berlin	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	5,25 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1985] [Fritz 1985] [Herzog 2003] [Detail 1987]	

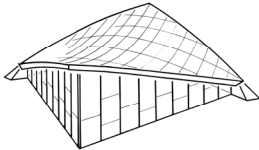
41	Serpentine Gallery Pavillon	2003
Skizze:		
		
Standort:	Serpentine Gallery Kensington Gardens London W2 3XA England	
Architekt:	Oscar Niemeyer, Rio de Janeiro, Brasilien	
Ingenieur:	Sir Robert McAlpine Ltd, Hemel Hempstead, UK	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., einachsig gespannt	
Bemerkungen:	abgebaut	
Quellenverweise:	[Drew 2008]	

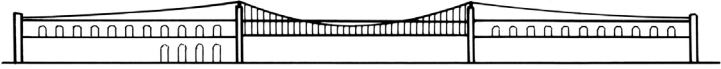
42	Flugzeughalle	1917
Skizze:		
		
Standort:	Cherbourg Frankreich	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	79,30 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Otto 1954]	


43	Kirche Jeanne D' Arc	1979
Skizze:		
		
Standort:	Église Jeanne D'Arc Place du Vieux Marché 76000 Rouen Frankreich	
Architekt:	L. Arretche, Paris	
Ingenieur:	U.B.E., Dreux	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A.	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Herzog 2003]	

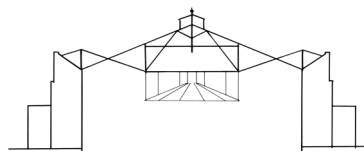
44	Pavillon der USA	1958
Skizze:		
		
Standort:	Gelände der Weltausstellung (Expo) Heysel-Park Brüssel Belgien	
Architekt:	Edward Stone, Cornelius,	
Ingenieur:	Edward Stone, Blaton Aubert	
Dachtyp:	Spreizbinder	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 92 m (innen) / Ø 116 m (außen)	
Spannweite (max.):	Ø 92 m, radial gespannt	
Bemerkungen:	Sockelgeschoss und Anbau sind am gleichen Standort erhalten	
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Otto 1966] [Rühle 1970] [Nather 1985] [Rabinovič 1966] [Makowski 1963] [Schwabe 1959]	

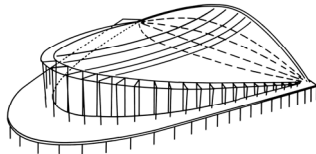
45	Pavillon de la France	1958
Skizze:		
		
Standort:	Gelände der Weltausstellung (Expo) Heysel-Park Brüssel Belgien	
Architekt:	G. Gillet	
Ingenieur:	R. Sarger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b):	70 m / 50 m	
Spannweite (max.):	80 m bzw. 100 m (diagonal), zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	abgebaut	
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Drew 1979] [Otto 1966] [Rühle 1970] [Makowski 1963] [Schwabe 1959]	

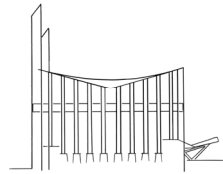
46	Informationspavillon	1958
Skizze:		
		
Standort:	Gelände der Weltausstellung (Expo) Heysel-Park Brüssel Belgien	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	R. Sarger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd quadratisch	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	abgebaut	
Quellenverweise:	[Siegel 1960]	

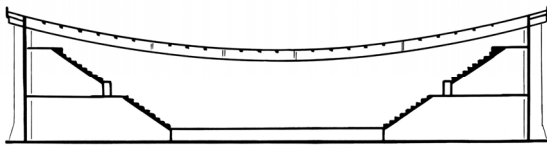
47	Fertigungshalle	1837
Skizze:		
		
Standort:	Lorient Frankreich	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Laurent	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	44 m / 20 m	
Spannweite (max.):	44 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Otto 1954] [Graefe 1989]	

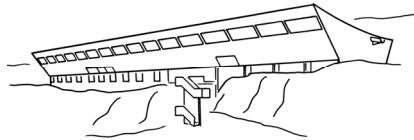
48	Ausstellungshalle	1937
Skizze:		
		
Standort:	Paris Frankreich	
Architekt:	Eugène Baudouin, Marcel Lods	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Seilbinder	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 450 m	
Spannweite (max.):	Ø 450 m, radial gespannt	
Bemerkungen:	nicht gebauter Entwurf	
Quellenverweise:	[Otto 1954] [Otto 1952]	

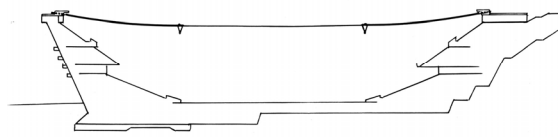
49	Rotunde Panorama	1839
Skizze:		
		
Standort:	heute: Théâtre du Rond-Point (zwischenzeitlich: Palais des Glaces) Avenue Franklin Delano Roosevelt 2 75008 Paris Frankreich	
Architekt:	Jakob Ignaz Hittorf (urspr.), Gabriel Jean Antoine Davioud	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 40 m	
Spannweite (max.):	Ø 40 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Graefe 1989]	

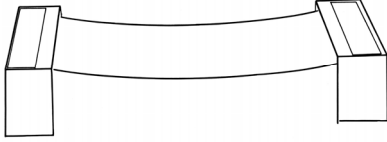
50	Centre des Industries Mécaniques	1951
Skizze:		
		
Standort:	heute: Centre des Nouvelles Industries et Technologies (CNIT) 2 Place de la Défense 92053 Paris la Défense Frankreich	
Architekt:	Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly, Bernard Louis Zehrfuss	
Ingenieur:	Bernard Laffaille, Jean Prouvé	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	dreieckig mit geschwungenen Seiten	
Abmessungen (l / b):	180 m / 200 m	
Spannweite (max.):	180 m bzw. 200 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	nicht gebauter Entwurf	
Quellenverweise:	[Otto 1954] [Otto 1952]	

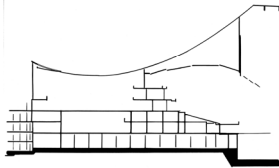
51	Kirche Notre Dame	1958
Skizze:		
Standort:	Église Notre-Dame de Royan 1, Rue Foncillon 17200 Royan Frankreich	
Architekt:	Guillaume Gillet, René Sarger	
Ingenieur:	René Sarger, Bernard Lafaille	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	22,50 m / 40 m	
Spannweite (max.):	22,50 m bzw. 40 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [AA 1960] [Picon 1997]	

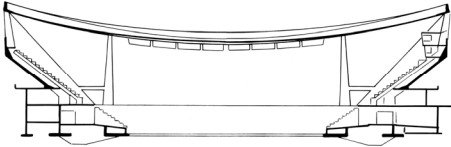
52	Sportpalast	1976
Skizze:		
Standort:	Dijon Frankreich	
Architekt:	J.F. Devaliere, Dijon	
Ingenieur:	R. Weisrock S.A., Saulcy-sur-Meurthe	
Dachtyp:	gebogene Träger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	72,50 m / 70,60 m	
Spannweite (max.):	72 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Herzog 2003] [Lips 1983]	

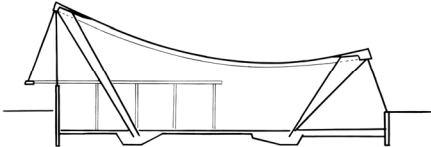
53	Maison de la Culture	1966
Skizze:		
		
Standort:	Espace Le Corbusier Rue de Saint-Just Malmont 42700 Firminy Frankreich	
Architekt:	Le Corbusier	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	20 m / 112 m	
Spannweite (max.):	20 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Boesinger 1986] [Neuwirth 1970]	

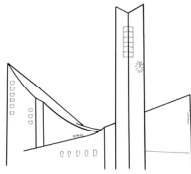
54	Fußballstadion	2003
Skizze:		
		
Standort:	Estádio Municipal de Braga Parque Norte, Dume 4710 Braga Portugal	
Architekt:	Eduardo Souto de Moura, Porto	
Ingenieur:	AFA Associados, Porto / Lissabon	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	200 m / 130 m	
Spannweite (max.):	200 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Detail 2004] [Stock 2005] [Drew 2008]	

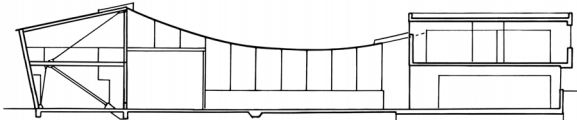
55	Portugiesischer Pavillon	1998
Skizze:		
Standort:	Gelände der Weltausstellung (Expo) Parque das Nações 1990 Lisboa Portugal	
Architekt:	Álvaro Siza Vieira	
Ingenieur:	Ove Arup, London; STA – Segadaes Tavares Ass., Lissabon	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	67 m / 50 m	
Spannweite (max.):	67 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	steht seit 2010 unter Denkmalschutz	
Quellenverweise:	[Sandaker 2008] [Drew 2008] [Flury 2010]	

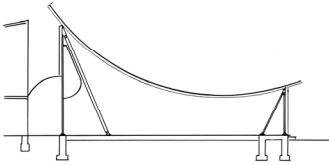
56	Theater	1975
Skizze:		
Standort:	Theater Basel Elisabethenstrasse 16 / Theaterstrasse 4051 Basel Schweiz	
Architekt:	Schwarz + Gutmann, Zürich / Basel	
Ingenieur:	Heinz Hossdorf (Hossdorf + Weiss), Basel	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	polygonal	
Abmessungen (l / b):	60 m / 49 m	
Spannweite (max.):	60 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Hossdorf 1975]	

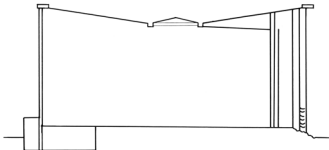
57	Sporthalle St. Jakob	1976
Skizze:		
Standort:	St. Jakobshalle Brüglingerstraße 19-21 4052 Basel Schweiz	
Architekt:	H. Luder, Giovanni Panozzo	
Ingenieur:	E. + A. Schmidt	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	achteckig	
Abmessungen (l / b):	90 m / 86 m	
Spannweite (max.):	90 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schmidt 1974] [St. Jakobshalle]	

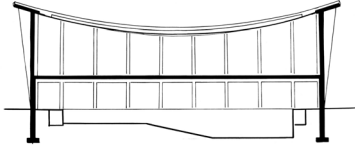
58	Saalbau-Hallenbad	1966
Skizze:		
Standort:	Saalbau-Hallenbad im CTS Zentralstrasse 60 2501 Biel Schweiz	
Architekt:	Max Schlup, Mario Scascighini, Edgar Studer	
Ingenieur:	H.P. Stocker und Partner AG, Bern	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	40 m / 72,50 m	
Spannweite (max.):	72,50 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Rühle 1970] [Ehrensperger 2002] [Hartmann 2004] [Wittfoht 1966]	

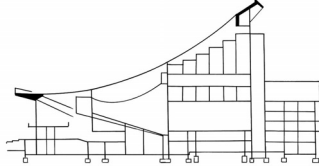
59	Bruder-Klaus-Kirche	1959
Skizze: 		
Standort:	Katholische Kirchengemeinde St. Gallen Herisauer Strasse 91 9015 St.Gallen - Winkeln Schweiz	
Architekt:	Ernst Brantschen, Alfons Weisser, BSA St. Gallen	
Ingenieur:	Heinz Hossdorf, SIA Basel	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd quadratisch	
Abmessungen (l / b):	26 m / 31 m	
Spannweite (max.):	k.A., zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	2000 saniert	
Quellenverweise:	[Born 1964]	

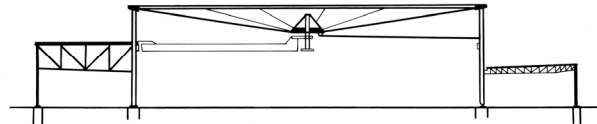
60	Werkhof	1999
Skizze: 		
Standort:	Stadtwerke Hohenems GmbH Kernstockstraße 12 a 6845 Hohenems Österreich	
Architekt:	Reinhard Drexel, Hohenems	
Ingenieur:	Merz, Kaufmann u. Partner; Ingenieurbüro Moosbrugger, Dornbirn	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	etwa 19,70 / 52,20 m	
Spannweite (max.):	19,70 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Detail 2001] [Merz 2001] [Dechau 2000] [Herzog 2003]	

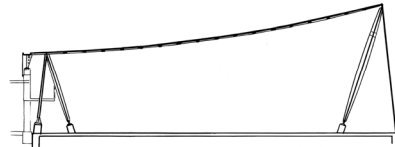
61	Lowara Company Offices	1985
Skizze:		
Standort:	Lowara Srl Via Dottor Lombardi 14 36075 Montebelluna Maggiore (Vicenza) Italien	
Architekt:	Renzo Piano	
Ingenieur:	Favero & Milan	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	17,50 m / 120 m	
Spannweite (max.):	17,50 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Pizzi 2003] [Angélil 1987] [Lowara]	

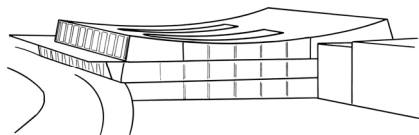
62	Französischer Pavillon	1937
Skizze:		
Standort:	Studentski Centar Savska Cesta 25 10000 Zagreb Kroatien	
Architekt:	Robert Edouard Camelot	
Ingenieur:	Paul Herbé, Bernard Laffaille	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 30 m	
Spannweite (max.):	Ø 30 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1954] [Graefe 1990-1] [Otto 1952] [Otto 1966] [Picon 1997]	


63	Neubau Technische Oberschule für Energetik	1979
Skizze:		
Standort:	Sporthalle mit Schwimmbad und Sälen Sofia Bulgarien	
Architekt:	Dora Todorova	
Ingenieur:	Georgi Kostov	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	18,90 m / 35,65 m	
Spannweite (max.):	34,75 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Kostov 1985]	

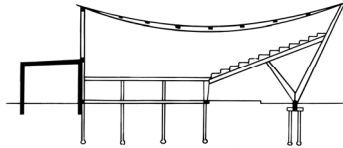
64	Theater	1978
Skizze:		
Standort:	Győri Nemzeti Színház (Nationaltheater) Czuczor Gergely utca 7 9022 Győr Ungarn	
Architekt:	Kálman Vincze	
Ingenieur:	Ferencz Filippovits	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd trapezförmig	
Abmessungen (l / b):	17 m / 58 m	
Spannweite (max.):	17 m bzw. 58 m, zweiachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Postulka 1979]	

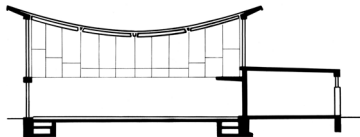
65	Rundhalle	1963
Skizze:		
		
Standort:	Binder + Co AG Grazer Straße 19-25 8200 Gleisdorf Österreich	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Kurt Koss, H. Beer	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 50 m (innen) / 79 m (außen)	
Spannweite (max.):	Ø 50 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Beer 1963] [Binder]	

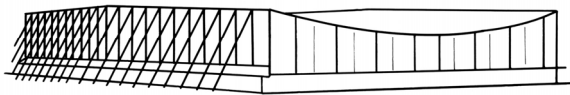
66	Römertherme	1999
Skizze:		
		
Standort:	Römertherme Baden Brusattiplatz 4 2500 Baden (bei Wien) Österreich	
Architekt:	R. Nemetz, W. Junger, R. Weber	
Ingenieur:	J. Gugeler, F. Fluhr (Schlaich, Bergermann und Partner)	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	74,50 m / 27,80 m	
Spannweite (max.):	27,80 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schober 2003] [Bögle 2005]	

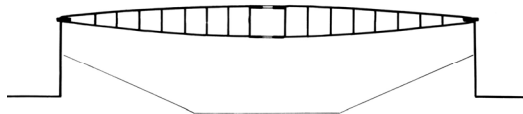
67	Flughafenterminal	1959
Skizze:		
		
Standort:	Flughafen Wien Abflugstraße 1300 Schwechat Österreich	
Architekt:	Pfeffer, Klaudy, Schinka (Planungsbüro Flughafen Wien)	
Ingenieur:	Fritz Pfeffer, Wien	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	60 m / 80 m	
Spannweite (max.):	60 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Born 1964]	

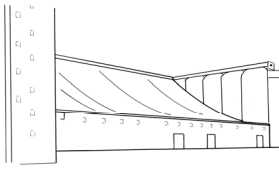
68	Wohnhaus	1826
Skizze:		
		
Standort:	Námestie Štefana Moyzesa 7 974 01 Banská Bystrica (Neusohl) Slowakei	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Friedrich Schnirch	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	2 x 6,15 m / 25,40 m	
Spannweite (max.):	6,15 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Ferjenčík 1975] [Ferjenčík 1992]	

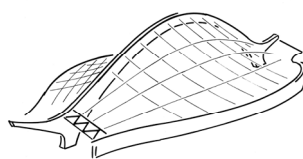
69	Sporthalle	1966
Skizze:		
		
Standort:	Rzeszowski Ośrodek Sportu i Rekreacji Księdza Józefa Jałowego 23A 35-959 Rzeszów Polen	
Architekt:	Kuś, Martens	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	37,60 m / 39,20 m	
Spannweite (max.):	36 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Rühle 1970]	

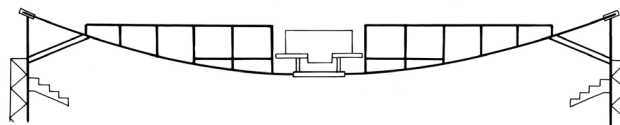
70	Olympisches Trainingszentrum	1954
Skizze:		
		
Standort:	Warschau Polen	
Architekt:	Wojciech Zabłocki, Warschau	
Ingenieur:	Stanisław Kuś	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	15 m / 29 m	
Spannweite (max.):	15 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Bauwelt 1974]	

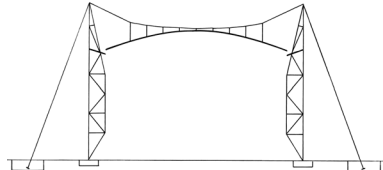
71	Eisstadion Hovet	1955
Skizze:		
		
Standort:	Hovet (Johanneshovs Isstadion) Arenavägen 35 121 77 Johanneshov (Stockholm) Schweden	
Architekt:	Paul Hedqvist	
Ingenieur:	David Jawerth	
Dachtyp:	Seilbinder	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	83 m / 118 m	
Spannweite (max.):	83 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1966] [Rühle 1970] [Jawerth 1966-2]	

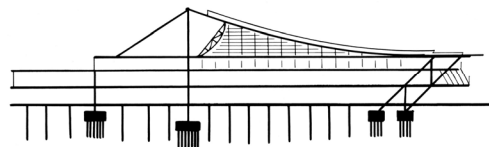
72	Stadthalle	1959
Skizze:		
		
Standort:	Utica Memorial Auditorium 400 Oriskany Street West Utica, NY 13502 USA	
Architekt:	Gehron, Seltzer	
Ingenieur:	Lev Zetlin	
Dachtyp:	Spreizbinder	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 67 m	
Spannweite (max.):	Ø 67 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Otto 1966] [Rabinovič 1966] [Makowski 1963] [Bräuer 1971]	

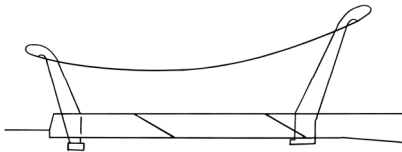
73	Getreidelagerhalle	1933
Skizze:		
Standort:	Cargill Inc. 100 Grain Street Albany, NY 12202-2109 USA	
Architekt:	James Stewart, Corp. Chicago	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	36,60 m / 82,50 m (4 Dächer)	
Spannweite (max.):	36,60 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1954] [Otto 1952] [Nerdinger 2005] [Dürbeck 1933]	

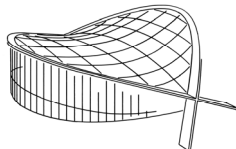
74	Hockey-Stadion	1959
Skizze:		
Standort:	David S. Ingalls Hockey Rink Sachem Street 73 , Prospect Street Yale University, New Haven, Connecticut USA	
Architekt:	Eero Saarinen	
Ingenieur:	Severud, Elstad und Krueger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd oval	
Abmessungen (l / b):	2 x 27,50 m / 70 m	
Spannweite (max.):	27,50 m bzw. 70 m, zweiachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Addis 2007] [Büttner 1985] [Drew 1979] [Otto 1966] [Halasz 1996] [Makowski 1963] [Sandaker 1994] [Saarinen 2005] [Román 2002] [Pelkonen 2006] [Picon 1997]	

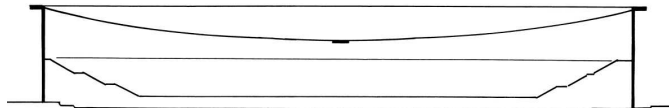
75	Madison Square Garden Arena	1968
Skizze:		
		
Standort:	Madison Square Garden 4 Pennsylvania Plaza New York, New York 10001 USA	
Architekt:	Charles Luckman Associates	
Ingenieur:	Severud, Perrone, Fischer, Sturm, Conlin, Bandel	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 123 m (innen), Ø 129 m (außen)	
Spannweite (max.):	Ø 123 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Schneider 1968]	

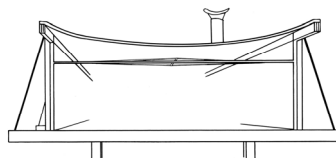
76	Lokomotiv-Ausstellungspavillon	1933
Skizze:		
		
Standort:	Chicago USA	
Architekt:	Louis Skidmore, Nathaniel A. Owings	
Ingenieur:	Leon Moisseiff	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 60 m	
Spannweite (max.):	Ø 60 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Otto 1954]	

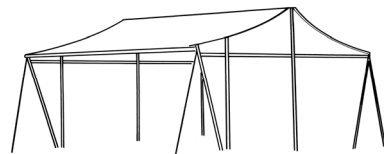
77	David L. Lawrence Convention Center	2003
Skizze:		
		
Standort:	David L. Lawrence Convention Center 1000 Ft. Duquesne Boulevard Pittsburgh, PA 15222 USA	
Architekt:	Rafael Viñoly Architects, New York	
Ingenieur:	Dewhurst Macfarlane & Partners, Goldreich Engineering	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	91-122 m / 294 m	
Spannweite (max.):	91-122 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Drew 2008] [Pittsburgh]	

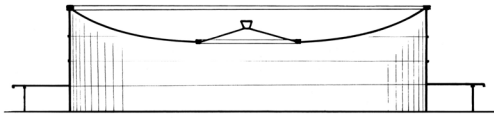
78	Terminal Dulles International Airport	1962
Skizze:		
		
Standort:	Washington Dulles International Airport 1 Saarinen Circle Dulles (Chantilly), VA 20166-7506 USA	
Architekt:	Eero Saarinen	
Ingenieur:	Boyd G. Anderson, Ammann & Whitney	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	52,80 m / 180 m (1996 verlängert auf 380 m)	
Spannweite (max.):	52,80 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[AA 1960] [Drew 1979] [Otto 1966] [Sandaker 1994] [Saarinen 2005] [Román 2002] [Pelkonen 2006] [Picon 1997]	

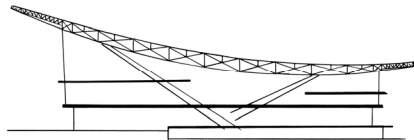
79	Raleigh-Arena	1953
Skizze:		
		
Standort:	J S Dorton Arena 1025 Blue Ridge Road Raleigh, NC 27607 USA	
Architekt:	Matthew Nowicki (urspr.); William Henley Deitrick	
Ingenieur:	Fred Severud, Elstad und Krueger	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd rund	
Abmessungen (l / b):	92 m / 97 m	
Spannweite (max.):	92 m bzw. 97 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1954] [Sanchez 1961] [Siegel 1960] [Addis 2007] [Otto 1953-1] [Otto 1952] [Büttner 1985] [Otto 1966] [Nather 1985] [Makowski 1963] [Otto 1953-2] [Picon 1997]	

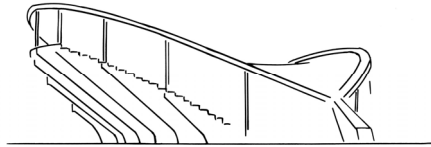
80	Oklahoma State Fair Arena	1965
Skizze:		
		
Standort:	Oklahoma State Fair 333 Gordon Cooper Boulevard Oklahoma City, OK 73107 USA	
Architekt:	Jack L. Scott & Associates, Oklahoma City	
Ingenieur:	T. Y. Lin & Associates, Dallas (Texas)	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	97,50 m / 121,90 m	
Spannweite (max.):	97,50 m bzw. 121,90 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Scott 1965]	


81	The Cocoon House / Healy Guest House	1950
Skizze:		
		
Standort:	Siesta Key Sarasota Florida USA	
Architekt:	Paul Rudolph, Ralph Twitchell	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	7 m / 12 m	
Spannweite (max.):	7 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Domin 2002]	

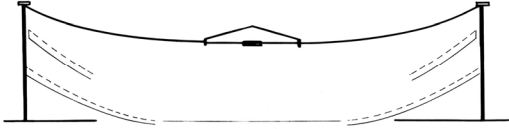
82,83	Coward Residence, Wheelan Cottages	1951
Skizze:		
		
Standort:	Siesta Key Sarasota Florida USA	
Architekt:	Paul Rudolph, Ralph Twitchell	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Drew 1979] [Domin 2002]	

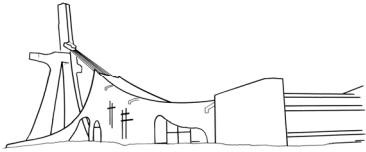
84	Villita Assembly Building	1960
Skizze:		
Standort:	Villita Assembly Building 401 Villita Street San Antonio, TX 78205 (Texas) USA	
Architekt:	O'Neil Ford & Associates	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 42 m (innen), Ø 57 m (außen)	
Spannweite (max.):	Ø 42 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Makowski 1963]	

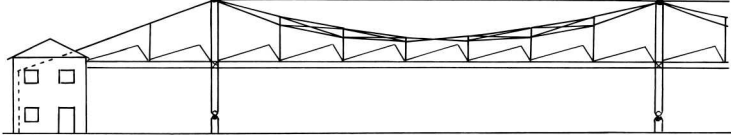
85	Sowjetischer Pavillon	1967
Skizze:		
Standort:	(ursprünglich) Montreal Quebec, Kanada (wiederaufgebaut) Moskau Russland	
Architekt:	Aschot A. Mndojanz, Michail V. Posochin	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	gebogene Fachwerkträger	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	k.A., einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	nach Ende der Expo in Montreal umgesetzt nach Moskau	
Quellenverweise:	[Expo 67] [Structurae]	

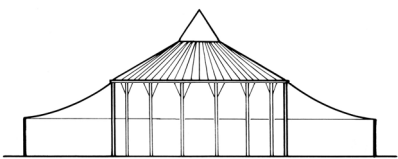
86	Sporthalle	1959
Skizze:		
		
Standort:	Ciudad Deportiva Avenida de Santa Catalina Havanna Kuba	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	42 m / 55 m	
Spannweite (max.):	42 m bzw. 55 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Sanchez 1961]	

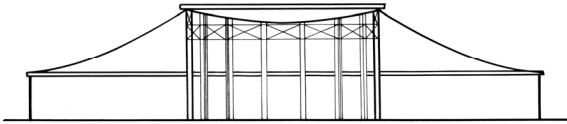
87	Ausstellungshalle Rio Grande do Sul	1954
Skizze:		
		
Standort:	Sao Paulo Brasilien	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Alberto Borges, Ricardo Costas Alliana	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	annähernd rechteckig	
Abmessungen (l / b):	102,80 m / 59,40 m	
Spannweite (max.):	102,80 m bzw. 59,40 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Siegel 1960] [Büttner 1985] [Otto 1956] [Otto 1966] [Nather 1985]	

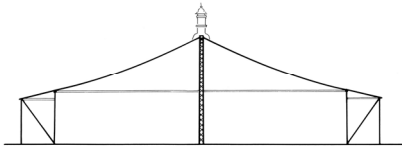
88	Stadion	1958
Skizze:		
Standort:	Cilindro Municipal Avenida José Pedro Varela Montevideo Uruguay	
Architekt:	Leonel Viera, Rios, Mondino, Miller	
Ingenieur:	Mondino, Voller, Viera	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund	
Abmessungen (Ø):	Ø 95 m	
Spannweite (max.):	Ø 95 m, radial gespannt	
Bemerkungen:	Einsturz des Daches (Oktober 2010) infolge eines Feuers bei Sanierungsarbeiten	
Quellenverweise:	[Sanchez 1961] [Büttner 1985] [Otto 1966] [Makowski 1963] [Montevideo] [Uruguay]	

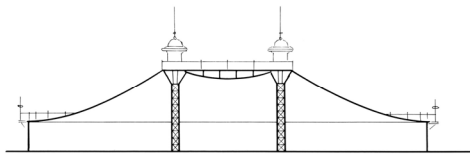
89	Kathedrale Saint Paul	1985
Skizze:		
Standort:	Cathédrale Saint-Paul Boulevard de Gaulle / Boulevard Angoulvant Le Plateau, Abidjan Elfenbeinküste	
Architekt:	Aldo Spirito	
Ingenieur:	Aldo Spirito	
Dachtyp:	biegesteife Träger	
Grundrissform:	annähernd dreieckig	
Abmessungen (l / b):	110 / 96 m	
Spannweite (max.):	110 m, einachsrig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Streit 1986]	


90	Hangar	1917
Skizze:		
		
Standort:	Hafen von Bizerta Tunis	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Cazenave, Minard	
Dachtyp:	abgehängtes Dach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	3 x 71 m / 27 m	
Spannweite (max.):	71 m, einachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Mislin 1985]	

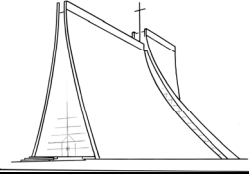
91	Werkstattgebäude Kesselfabrik Bari	1894
Skizze:		
		
Standort:	Moskau Russland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Wladimir G. Schuchow	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund (Kreisring)	
Abmessungen (Ø):	Ø 22 m (innen), Ø 44 m (außen)	
Spannweite (max.):	11 m, radial gespannt	
Bemerkungen:	abgerissen	
Quellenverweise:	[Graefe 1990-1] [Graefe 1990-2]	

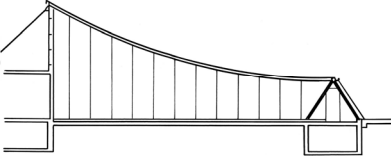
92	Rotunde	1896
Skizze:		
		
Standort:	Ausstellungsgelände Allrussische Ausstellung Nischni Nowgorod Russland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Wladimir G. Schuchow	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	kreisrund (Kreising)	
Abmessungen (Ø):	Ø 25 m (innen), Ø 68 m (außen)	
Spannweite (max.):	25 m (innen) bzw. 21,50 m (umlaufend), radial gespannt	
Bemerkungen:	heutiger Zustand unbekannt	
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Graefe 1989] [Graefe 1990-1] [Graefe 1990-2] [Rabinovič 1966] [Picon 1997]	

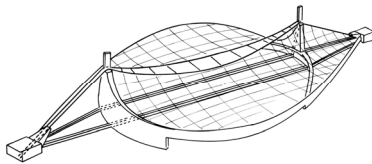
93	rechteckige Pavillons	1896
Skizze:		
		
Standort:	Ausstellungsgelände Allrussische Ausstellung Nischni Nowgorod Russland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Wladimir G. Schuchow	
Dachtyp:	Hängedach (2 Gebäude)	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	2 x 15 m / 68 m	
Spannweite (max.):	15 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:	heutiger Zustand unbekannt	
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Graefe 1989] [Graefe 1990-1] [Graefe 1990-2] [Rabinovič 1966]	

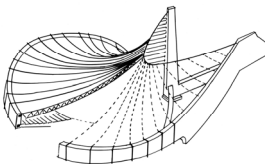
94	Ovalbau	1896
Skizze:		
		
Standort:	Ausstellungsgelände Allrussische Ausstellung Nischni Nowgorod Russland	
Architekt:	k.A.	
Ingenieur:	Wladimir G. Schuchow	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	oval	
Abmessungen (l / b):	70 m / 51 m	
Spannweite (max.):	25,50 m, einachsigt und radial gespannt	
Bemerkungen:	heutiger Zustand unbekannt	
Quellenverweise:	[Mislin 1985] [Graefe 1989] [Graefe 1990-1] [Graefe 1990-2] [Rabinovič 1966] [Picon 1997]	

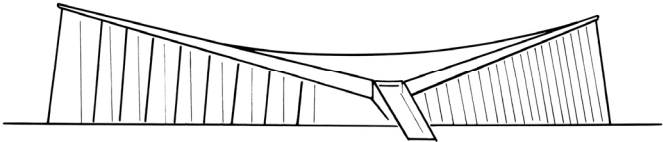
95	Konferenzzentrum	1974
Skizze:		
		
Standort:	Mekka Saudi-Arabien	
Architekt:	Frei Otto, Rolf Gutbrod, Hermann Kendel	
Ingenieur:	Ove Arup und Partner	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	k.A.	
Abmessungen (l / b):	k.A.	
Spannweite (max.):	etwa 46 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1995] [Nerdinger 2005]	

96	Luce-Kapelle Tunghai-Universität	1963
Skizze:		
Standort:	Luce Memorial Kapelle DàXué Road, Situn District Taichung City Taiwan	
Architekt:	Ieoh Ming Pei	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	sechseckig	
Abmessungen (l / b):	2 x 13 m / 27 m	
Spannweite (max.):	13 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1985]	

97	c-Office	2004
Skizze:		
Standort:	Nagoya Japan	
Architekt:	FT Architects, Tokio	
Ingenieur:	Syuji Tada, Shingo Otsuka, Akira Okada, Tokio	
Dachtyp:	Hängedach	
Grundrissform:	rechteckig	
Abmessungen (l / b):	etwa 15 m / 33 m	
Spannweite (max.):	15 m, einachsigt gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Cellarius 2004] [FT Architects]	

98	1. Sporthalle Yoyogi	1964
Skizze:		
		
Standort:	Kokuritsu Yoyogi Kyōgijō (1. Nationale Sporthalle Yoyogi) Yoyogi Park Tokio Japan	
Architekt:	Kenzo Tange	
Ingenieur:	Yoshikatsu Tsuboi, Tsuboi Kawagachi	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach (gebogene Träger)	
Grundrissform:	annähernd oval	
Abmessungen (l / b):	etwa 2 x 51,60 m / 126 m + 2 x 44 m	
Spannweite (max.):	51,60 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1985] [Krauss 2000] [Drew 1979] [Rühle 1970] [Jawerth 1966-1] [Tsuboi 1966] [Tsuboi 1964] [Nather 1985] [Picon 1997]	

99	2. Sporthalle Yoyogi	1964
Skizze:		
		
Standort:	Kokuritsu Yoyogi Kyōgijō (2. Nationale Sporthalle Yoyogi) Yoyogi Park Tokio Japan	
Architekt:	Kenzo Tange	
Ingenieur:	Yoshikatsu Tsuboi	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach (gebogene Träger)	
Grundrissform:	annähernd rund	
Abmessungen (Ø):	Ø 68 m	
Spannweite (max.):	etwa Ø 60 m, radial gespannt	
Bemerkungen:		
Quellenverweise:	[Otto 1985] [Drew 1979] [Jawerth 1966-1] [Tsuboi 1964]	

100	Versammlungshalle	1957
Skizze:		
Standort:	Shizuoka Japan	
Architekt:	Kenzo Tange	
Ingenieur:	k.A.	
Dachtyp:	gegenläufig gekrümmtes Dach	
Grundrissform:	quadratisch	
Abmessungen (l / b):	etwa 48 m / 48 m	
Spannweite (max.):	68 m, zweiachsig gespannt	
Bemerkungen:	Gebäude ist abgebrochen	
Quellenverweise:	[Schmidt 2003]	